

TUGAS AKHIR - EE 184801

**PENGUNAAN KURVA BATAS ENERGI UNTUK
PENYEDERHANAAN ANALISIS BAHAYA BUSUR API PADA
SISTEM KELISTRIKAN PT. PUPUK KUJANG**

Ghiffari Al Rasyd
NRP 07111540000109

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.
Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



TUGAS AKHIR - EE 184801

**Penggunaan Kurva Batas Energi untuk
Penyederhanaan Analisis Bahaya Busur Api pada
Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kujang**

Ghiffari Al Rasyd
NRP 07111540000109

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.
Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



FINAL PROJECT - EE 184801

*Energy Boundary Curves Application to Simplify The
Analysis of Arc-Hazard in PT. Pupuk Kujang
Electricity System*

Ghiffari Al Rasyd
NRP 07111540000109

Advisor
Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.
Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.

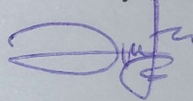
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Penggunaan Kurva Batas Energi untuk Penyederhanaan Analisis Bahaya Busur Api pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kujang”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 2019



Ghiffari Al Rasyd
07111540000109

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PENGUNAAN KURVA BATAS ENERGI UNTUK
PENYEDERHANAAN ANALISIS BAHAYA BUSUR
API PADA SISTEM KELISTRIKAN
PT. PUPUK KUJANG**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,

Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
NIP. 196603181990101001

Dr. Dimas Fajar U. P., ST., MT.
NIP. 198811082012121001



PENGUNAAN KURVA BATAS ENERGI UNTUK PENYEDERHANAAN ANALISIS BAHAYA BUSUR API PADA SISTEM KELISTRIKAN PT. PUPUK KUJANG

Nama : Ghiffari Al Rasyd
Dosen Pembimbing I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.
Dosen Pembimbing II : Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.

ABSTRAK

Busur api merupakan salah satu faktor yang sangat diperhatikan pada suatu sistem kelistrikan sehingga perlu dilakukan analisis untuk menjamin keselamatan pekerja dari paparan energi insiden yang terpancarkan. Metode dengan standar IEEE 1548-2002 dapat digunakan dalam melakukan analisis bahaya busur api serta dapat menentukan persyaratan dari pakaian pelindung bagi pekerja atau *Personal Protective Equipment* (PPE). Namun, bila digunakan pada sistem kelistrikan dengan banyak bus, maka memerlukan banyak data dan waktu yang lama dalam menentukan kategori PPE. Metode kurva batas energi digunakan pada tugas akhir ini untuk menyederhanakan analisis. Metode ini merupakan penyederhanaan yang mengacu pada standar IEEE 1584-2002. Hasil dari perpotongan kurva batas energi dengan kurva karakteristik dari pengaman arus lebih atau *Overcurrent Protective Device* (OCPD) suatu bus yang dianalisis adalah penentuan PPE yang sesuai dengan ketentuan NFPA 70E-2015 serta perhitungan jarak batas aman maksimum busur api. Studi aktual mengenai penyederhanaan analisis bahaya busur api dilakukan pada PT. Pupuk Kujang. Hasil akhir dari analisis adalah dengan menggunakan metode kurva batas energi pada tiap bus dapat menentukan kategori PPE yang tepat dan lebih cepat dibandingkan dengan metode dengan standar IEEE 1548-2002, namun akan timbul perbedaan pada penentuan jarak batas aman busur api. Pada bus 2002-K hasil *resetting* dengan PPE kategori 3 yang telah ditunjukkan oleh kedua metode, namun dengan jarak batas perlindungan sejauh 16,624 meter untuk metode standar IEEE 1584-2002 dan jarak batas perlindungan maksimum sejauh 20,625 meter untuk metode kurva batas energi.

Kata kunci: busur api, standar IEEE 1584-2002, kurva batas energi, *personal protective equipment*, NFPA 70E-2015

Halaman ini sengaja dikosongkan

ENERGY BOUNDARY CURVES APPLICATION TO SIMPLIFY THE ANALYSIS OF ARC-HAZARD IN PT. PUPUK KUJANG ELECTRICITY SYSTEM

Name : Ghiffari Al Rasyd
Advisor I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.
Advisor II : Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.

ABSTRACT

Arc flash is one of many factors that is very concerned in electrical power system so the analysis is necessary to ensure the safety of workers from being exposed by incident energy emitted. The IEEE 1548-2002 standard method can be used in conducting arc flash hazard analysis and requirements from personal protective equipment (PPE) can be determined. However, if it is used in electrical power systems with many buses, it requires a lot of data and a long time to determine the PPE category. The energy boundary curve method is used in this final project to simplify the analysis. This method is a simplification from IEEE 1584-2002 standard. The result of the intersection of energy boundary curves with characteristic curves of overcurrent protective devices (OCPD) of a bus that is analyzed is the determination of PPE in accordance with the provisions of NFPA 70E-2015 and the calculation of the maximum distance of the arc flash protection boundary that can protect workers from arc flash. The actual study on simplification of arc flash analysis is carried out at PT. Pupuk Kujang. The final result of the analysis is that by using the energy boundary curve method can determine the right PPE category which is faster than the IEEE 1584 - 2002 standard method. However, there are differences in determining the arc flash protection boundary for each method. On bus 2002-K, the results of resetting with PPE category 3 were shown by the two methods, but with arc flash protection boundary of 16,624 meters for the IEEE 1584-2002 standard method and maximum protection boundary of 20,625 meters for the energy boundary curve method.

Keywords: *arc flash, energy boundary curve, IEEE 1584 - 2002 standard, personal protective equipment, NFPA 70E-2015*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya ucapkan kehadirat Allah azza wa jalla yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, sehingga saya selaku penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **“Penggunaan Kurva Batas Energi untuk Penyederhanaan Analisis Bahaya Busur Api pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kujang”**. Tujuan penyusunan Tugas Akhir ini adalah sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Dalam penulisan Tugas Akhir ini, tentunya tidak lepas dari dukungan dan bantuan orang-orang yang telah banyak membantu penulis. Untuk itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Segenap keluarga besar terutama ayah, ibu, dan adik-adik tercinta yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan doa untuk keberhasilan penulis.
2. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T. dan Bapak Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan saran, ilmu, dan bimbingannya.
3. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan bimbingan selama penulis menempuh pendidikan di Teknik Elektro ITS.
4. Rekan-rekan Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST) ITS serta teman-teman angkatan e55 atas segala dukungannya.
5. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam penyusunan Tugas Akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi banyak pihak. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik, koreksi, dan saran dari pembaca yang bersifat membangun untuk pengembangan ke arah yang lebih baik.

Surabaya, Januari 2019

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

JUDUL

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK i

ABSTRACT iii

KATA PENGANTAR..... v

DAFTAR ISI..... vii

DAFTAR GAMBAR..... ix

DAFTAR TABEL xiii

BAB 1 PENDAHULUAN 1

1.1 Latar Belakang Masalah..... 1

1.2 Perumusan Masalah..... 2

1.3 Batasan Masalah..... 2

1.4 Tujuan Tugas Akhir 2

1.5 Metodologi 3

1.6 Sistematika Penulisan..... 4

1.7 Relevansi 4

BAB 2 BUSUR API DAN KOORDINASI PROTEKSI SISTEM

KELISTRIKAN 7

2.1 Definisi Busur Api (*Arc Flash*) 7

2.2 Penggunaan Standar IEEE 1584-2002 sebagai Dasar Perhitungan Energi Insiden pada Busur Api [3]..... 8

2.1.1 Perhitungan Arus Gangguan *Arcing*..... 8

2.1.2 Perhitungan *Incident Energy* atau Energi Insiden 9

2.3 Metode Perhitungan Busur Api dengan Kurva Batas Energi [6] 12

2.4 Jarak Batas Aman Busur Api [5]..... 13

2.5 *Personal Protective Equipment* (PPE) atau Alat Pelindung Diri (APD) Sesuai dengan Standar NFPA 70E-2015 [5] 16

2.6 Gangguan pada Sistem Kelistrikan 19

2.6.1 Gangguan Beban Lebih (*Overload*) 19

2.6.2 Gangguan Hubung Singkat (*Short Circuit*)..... 19

2.7 Rele Arus Lebih Gangguan Fasa (*Phase Over Current Relay*) 20

2.8 Pengaturan Rele Arus Lebih Gangguan Fasa 22

BAB 3 SISTEM KELISTRIKAN PT. PUPUK KUJANG..... 27

3.1 Kelistrikan PT. Pupuk Kujang..... 27

3.2 Data Kelistrikan pada PT. Pupuk Kujang	28
3.3 Kapasitas Pembangkit di PT. Pupuk Kujang	28
3.4 Sistem Distribusi di PT. Pupuk Kujang	29
3.5 Sistem Pengaman Arus Lebih PT. Pupuk Kujang.....	31
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS DATA.....	37
4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kujang	37
4.2 Pemilihan Tipikal Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kujang.....	37
4.3 Analisis Busur Api.....	41
4.4 Perhitungan Busur Api dengan <i>Setting</i> Waktu Rele Pengaman Eksisting PT. Pupuk Kujang.....	41
4.4.1. Perhitungan Busur Api dengan Menggunakan Standar IEEE 1594-2002.....	41
4.4.2. Perhitungan Busur Api dengan Menggunakan Metode Kurva Batas Energi	55
4.5 Perhitungan Busur Api dengan <i>Setting</i> Waktu Rele Pengaman <i>Resetting</i> PT. Pupuk Kujang.....	87
4.5.1. Perhitungan Busur Api dengan Menggunakan Standar IEEE 1594-2002.....	88
4.5.2. Perhitungan Busur Api dengan Menggunakan Metode Kurva Batas Energi	101
4.6 Perbandingan Metode Perhitungan Menggunakan IEEE 1584 -2002 dengan Metode Menggunakan Kurva Batas Energi pada Kondisi Eksisting dan <i>Resetting</i>	123
BAB 5 PENUTUP	131
5.1 Kesimpulan.....	131
5.2 Saran.....	132
DAFTAR PUSTAKA.....	133
BIOGRAFI PENULIS.....	135

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Ilustrasi Zona Batas-Batas Pendekatan (<i>Limits of Approach</i>) [5].....	14
Gambar 2.2	Gambar karakteristik kurva rele waktu instan	20
Gambar 2.3	Gambar karakteristik kurva rele waktu tertentu.....	21
Gambar 2.4	Gambar karakteristik kurva rele waktu invers	22
Gambar 2.5	Gambar pengaman arus lebih pada transformator	23
Gambar 3.1	Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kujang	27
Gambar 4.1	Tipikal 1 PT. Pupuk Kujang	38
Gambar 4.2	Tipikal 2 PT. Pupuk Kujang	38
Gambar 4.3	Tipikal 3 PT. Pupuk Kujang	39
Gambar 4.4	Tipikal 4 PT. Pupuk Kujang	39
Gambar 4.5	Tipikal 5 PT. Pupuk Kujang	40
Gambar 4.6	Tipikal 6 PT. Pupuk Kujang	40
Gambar 4.7	Kurva batasan energi <i>swirchgear</i> tegangan 13,8 kV yang <i>ungrounded</i>	60
Gambar 4.8	Kurva batasan energi <i>swirchgear</i> tegangan 2,4 kV yang <i>ungrounded</i>	60
Gambar 4.9	Kurva batasan energi MCC tegangan 2,4 kV yang <i>ungrounded</i>	61
Gambar 4.10	Rele R52-13 sebagai pengaman bus GI Kujang	63
Gambar 4.11	Kurva batas energi pada kurva rele R52-13 sebagai pengaman bus GI Kujang	64
Gambar 4.12	Rele R52-13B sebagai pengaman bus 00-SG-01	65
Gambar 4.13	Kurva batas energi pada kurva rele R52-13B sebagai pengaman bus 00-SG-01.....	66
Gambar 4.14	Rele R52-F2 dan R63-LBS-1A sebagai pengaman bus 63-LBS-1A.....	67
Gambar 4.15	Kurva batas energi pada kurva rele R52-F2 dan R63-LBS-1A sebagai pengaman bus 63-LBS-1A	68
Gambar 4.16	Rele R62-MCC-2 sebagai pengaman Bus3	69
Gambar 4.17	Kurva batas energi pada kurva rele R62-MCC-2 sebagai pengaman Bus3.....	70
Gambar 4.18	Rele R52-11 sebagai pengaman bus 2002-K	71

Gambar 4.19	Kurva batas energi pada kurva rele R52-11 sebagai pengaman bus 2002-K.....	72
Gambar 4.20	Rele R52-5 sebagai pengaman Bus56	73
Gambar 4.21	Kurva batas energi pada kurva rele R52-5 sebagai pengaman Bus56	74
Gambar 4.22	Rele R52-3 sebagai pengaman Bus81	75
Gambar 4.23	Kurva batas energi pada kurva rele R52-3 sebagai pengaman Bus81	76
Gambar 4.24	Rele R52-6 sebagai pengaman Bus64	77
Gambar 4.25	Kurva batas energi pada kurva rele R52-6 sebagai pengaman Bus64	77
Gambar 4.26	Rele R52-12 sebagai pengaman bus GPA HOUSING.....	78
Gambar 4.27	Kurva batas energi pada kurva R52-12 sebagai pengaman bus GPA HOUSING	79
Gambar 4.28	Rele R52-2' sebagai pengaman Bus73	80
Gambar 4.29	Kurva batas energi pada kurva rele R52-2' sebagai pengaman Bus73	81
Gambar 4.30	Rele R63TR2 sebagai pengaman bus 62-MCC-2.....	82
Gambar 4.31	Kurva batas energi pada kurva rele R63TR2 sebagai pengaman bus 62-MCC-2.....	82
Gambar 4.32	Rele R52-Fxx3 sebagai pengaman bus MCC-POMPA	83
Gambar 4.33	Kurva batas energi pada kurva rele R52-Fxx3 sebagai pengaman bus MCC-POMPA	84
Gambar 4.34	Rele R52-5 sebagai pengaman Bus56 dan bus MCC-3.....	85
Gambar 4.35	Kurva batas energi pada kurva rele R52-5 sebagai pengaman bus MCC-3.....	85
Gambar 4.36	Rele R52-5 sebagai pengaman Bus81 dan bus MCC-8.....	86
Gambar 4.37	Kurva batas energi pada kurva rele R52-3 sebagai pengaman bus MCC-8.....	87
Gambar 4.38	Rele R52-13 sebagai pengaman bus GI Kujang	101

Gambar 4.39	Kurva batas energi pada kurva rele R52-13 hasil <i>resetting</i> sebagai pengaman bus GI Kujang.....	102
Gambar 4.40	Rele R52-13B sebagai pengaman bus 00-SG-01	103
Gambar 4.41	Kurva batas energi pada kurva rele R52-13B hasil <i>resetting</i> sebagai pengaman bus 00-SG-01	104
Gambar 4.42	Rele R52-F2 dan R63-LBS-1A sebagai pengaman bus 63-LBS-1A.....	105
Gambar 4.43	Kurva batas energi pada kurva rele R52-F2 dan R63-LBS-1A hasil <i>resetting</i> sebagai pengaman bus 63-LBS-1A	105
Gambar 4.44	Rele R62-MCC-2 sebagai pengaman Bus3	106
Gambar 4.45	Kurva batas energi pada kurva rele R62-MCC-2 hasil <i>resetting</i> sebagai pengaman Bus3	107
Gambar 4.46	Rele R52-11 sebagai pengaman bus 2002-K	108
Gambar 4.47	Kurva batas energi pada kurva rele R52-11 hasil <i>resetting</i> sebagai pengaman bus 2002-K	109
Gambar 4.48	Rele R52-5 sebagai pengaman Bus56.....	110
Gambar 4.49	Kurva batas energi pada kurva rele R52-5 hasil <i>resetting</i> sebagai pengaman Bus56.....	111
Gambar 4.50	Rele R52-3 sebagai pengaman Bus81.....	111
Gambar 4.51	Kurva batas energi pada kurva rele R52-3 hasil <i>resetting</i> sebagai pengaman Bus81	112
Gambar 4.52	Rele R52-6 sebagai pengaman Bus64.....	113
Gambar 4.53	Kurva batas energi pada kurva rele R52-6 hasil <i>resetting</i> sebagai pengaman Bus64.....	113
Gambar 4.54	Rele R52-12 sebagai pengaman bus GPA HOUSING	114
Gambar 4.55	Kurva batas energi pada kurva R52-12 hasil <i>resetting</i> sebagai pengaman bus GPA HOUSING.....	115
Gambar 4.56	Rele R52-2' sebagai pengaman Bus73	116
Gambar 4.57	Kurva batas energi pada kurva rele R52-2' hasil <i>resetting</i> sebagai pengaman Bus73.....	117
Gambar 4.58	Rele R63TR2 sebagai pengaman bus 62-MCC-2	118
Gambar 4.59	Kurva batas energi pada kurva rele R63TR2 sebagai hasil <i>resetting</i> pengaman bus 62-MCC-2	118

Gambar 4.60	Rele R52-Fxx3 sebagai pengaman bus MCC-POMPA.....	119
Gambar 4.61	Kurva batas energi pada kurva rele R52-Fxx3 dari hasil <i>resetting</i> sebagai pengaman bus MCC-POMPA.....	120
Gambar 4.62	Rele R52-5 sebagai pengaman Bus56 dan bus MCC-3.....	121
Gambar 4.63	Kurva batas energi pada kurva rele R52-5 hasil <i>resetting</i> sebagai pengaman bus MCC-3	121
Gambar 4.64	Rele R52-5 sebagai pengaman Bus81 dan bus MCC-8.....	122
Gambar 4.65	Kurva batas energi pada kurva rele R52-3 hasil <i>resetting</i> sebagai pengaman bus MCC-8	123

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Tabel faktor penyebab munculnya busur Api [4]	7
Tabel 2.2	Tabel data parameter yang dibutuhkan untuk menghitung energi insiden.....	11
Tabel 2.3	Tabel data parameter yang dibutuhkan untuk menghitung energi insiden.....	11
Tabel 2.4	Kategori <i>personal protective equipment</i> (PPE)	17
Tabel 2.5	Koefisien kurva rele <i>inverse</i>	24
Tabel 2.6	CTI rele.....	25
Tabel 3.1	Rangkuman jumlah pembangkitan, pembebanan, dan <i>demand</i>	28
Tabel 3.2	Data kapasitas pembangkit di PT. Pupuk Kujang.....	28
Tabel 3.3	Data tranformator pada PT. Pupuk Kujang	30
Tabel 4.1	Bus yang skan dilakukan analisis busur api.....	41
Tabel 4.2	Data arus gangguan bolted (Isc bolted) dan FCT	42
Tabel 4.3	Data hasil simulasi menggunakan standar IEEE 1584-2002 rele eksisting	43
Tabel 4.4	Data arus gangguan bolted (Isc bolted) dan FCT <i>resetting</i>	88
Tabel 4.5	Data hasil simulasi menggunakan standar IEEE 1584-2002 rele <i>resetting</i>	89
Tabel 4.6	Perbandingan penentuan PPE antara IEEE 1584-2002 pada <i>software</i> dan perhitungan manual serta kurva batasan energi kondisi eksisting	124
Tabel 4.7	Perbandingan penentuan jarak batas aman busur api antara IEEE 1584-2002 pada <i>software</i> dan perhitungan manual serta kurva batasan energi kondisi eksisting	124
Tabel 4.8	Perbandingan penentuan PPE antara IEEE 1584-2002 tiap metode kondisi <i>resetting</i>	125
Tabel 4.9	Perbandingan penentuan jarak batas aman busur api tiap metode kondisi <i>resetting</i>	126
Tabel 4.10	Standar PPE yang diberikan NFPA 70E-2015 pada tiap bus.....	128

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

PT. Pupuk Kujang yang berlokasi di Cikampek, Jawa Barat, merupakan pabrik penghasil pupuk. Pabrik ini mempunyai dua buah pabrik yaitu pabrik K-1 A dan pabrik K-1B. Keduanya memiliki total beban sebesar 18,2 MVA. PT. Pupuk Kujang sekarang disuplai dari satu pembangkit berupa generator turbin gas yang berkapasitas 18,35 MW serta Utility dari PLN.

Adanya perubahan konfigurasi dari sistem kelistrikan perusahaan, maka diperlukan evaluasi agar dapat terhindar dari gangguan-gangguan yang tidak diinginkan. Salah satu gangguan yang dapat menyebabkan ancaman terhadap keselamatan para pekerja yaitu akibat bahaya busur api. Busur api atau *arc flash* merupakan suatu keadaan berbahaya dimana muncul percikan listrik dalam bentuk plasma dan terjadi perlepasana energi panas [1]–[3]. Busur api akan muncul ketika arus listrik mengalir pada saluran yang seharusnya tidak teraliri (*arcing fault current*), seperti arus yang mengalir antara fasa satu ke fasa lainnya, fasa ke netral, dan fasa ke tanah [2]. Busur api dapat muncul karena kegagalan mekanik, kegagalan isolasi, debu, korosi, kondensasi, tekanan tegangan berlebih pada celah sempit, dan kesalahan pekeja pada peralatan bertegangan [4]. Konduktor atau bagian saluran listrik ketika sedang dialiri arus baik dalam kondisi tidak dilindungi (terbuka) maupun dilindungi (tertutup) berpotensi menimbulkan busur api dan membahayakan pekerja disekitar [5].

Dari bahaya yang dapat ditimbulkan oleh busur api, maka diperlukan peralatan perlindungan standar yang harus dipakai pekerja ketika akan melakukan pekerjaan disekitar pelatan yang dialiri oleh listrik. Analisis busur api diperlukan dalam penentuan kategori peralatan perlindungan diri (PPE). Menurut standar IEEE 1584 tahun 2002, analisis busur api dilakukan dengan menganalisis juga hubung singkat serta koordinasi proteksi dan evaluasi mengenai sistem kelistrikan seperti jenis bus, jarak antar konduktor, konfigurasi bus, dan lainnya. Data yang banyak tersebut diperlukan guna untuk menganalisis arus gangguan *arcing (arcing fault current)* dan energi insiden (*incident energy*) dari busur api. Bila sistem memiliki banyak bus, maka akan diperlukan banyak data serta waktu analisis yang cukup lama [6]. Berdasarkan hal tersebut, Metode yang

digunakan untuk menganalisis fenomena busur api pada tugas akhir ini adalah menggunakan kurva batasan energi (*energy boundary curves*). Secara umum, metode ini mempersingkat analisis penentuan kategori PPE yang bersesuaian dengan level energi insidennya.

1.2 Perumusan Masalah

Dalam Tugas Akhir ini, akan dibahas beberapa perumusan masalah, diantaranya:

1. Bagaimana analisis bahaya busur api menggunakan metode standar IEEE 1584-2002.
2. Bagaimana analisis bahaya busur api menggunakan metode kurva batas energi.
3. Bagaimana perbandingan hasil analisis kedua metode.
4. Apakah koordinasi rele arus lebih gangguan fasa eksisting pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Kujang sudah tepat.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada pengerjaan Tugas Akhir ini adalah:

1. Level tegangan bus yang dianalisis hanya pada level tegangan menengah.
2. *Setting* waktu pengaman yang diamati pada Tugas Akhir ini hanya pada rele arus lebih gangguan fasa.
3. *Fault Clearing Time* dibatasi hanya sampai 2 detik.
4. Penentuan PPE (*Personal Protective Equipment*) dan kategori busur api berdasarkan hasil analisis.

1.4 Tujuan Tugas Akhir

Tujuan dilakukannya Tugas Akhir ini antara lain:

1. Memodelkan, menyimulasikan, dan menganalisis kerja sistem kelistrikan PT. Pupuk Kujang berdasarkan bahaya busur api.
2. Membuktikan bahwa dengan menggunakan metode kurva batas energi akan mempercepat perhitungan analisis bahaya busur api.
3. Menentukan kategori resiko yang timbul akibat pengaruh energi busur api sesuai NFPA 70E-2015 sehingga didapatkan perlengkapan perlindungan yang sesuai untuk digunakan oleh pekerja

4. Dapat menetapkan jarak aman pekerja untuk mengurangi resiko luka bakar akibat energi busur api.
5. Dapat menentukan koordinasi proteksi arus lebih yang tepat pada sistem kelistrikan apabila diperlukan.

1.5 Metodologi

Metodologi yang akan digunakan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur
Dalam pengerjaan tugas akhir ini, penulis melakukan studi literatur untuk memperkuat ide dan mencari teori penunjang melalui membaca dan mempelajari buku, jurnal ilmiah (*paper*), serta *browsing* melalui internet mengenai analisis bahaya busur api. Selain itu, penulis juga mempelajari perhitungan arus gangguan *arcing* dan energi insiden.
2. Pengumpulan Data
Penulis melakukan pengumpulan data-data yang dibutuhkan untuk tugas akhir ini. Pengumpulan data yang tepat dilakukan untuk menunjang keberhasilan dari simulasi dan keakuratan hasil tugas akhir. Data-data yang diperlukan antara lain adalah data *single line diagram* PT. Pupuk Kujang dan data peralatan-peralatan listrik yang meliputi data generator, rating saluran atau kabel, transformator, bus, serta beban yang terpasang seperti motor listrik dan yang lainnya. Selain itu, data *setting* waktu rele pengaman eksisting juga diperlukan.
3. Pemodelan dan Simulasi
Setelah mendapatkan data yang dibutuhkan, pada tahap ini penulis akan melakukan pemodelan sistem kelistrikan PT. Pupuk Kujang dalam bentuk *single line diagram*. Pemodelan dilakukan menggunakan *software*. Pemodelan ini bertujuan agar dapat melakukan simulasi dan analisis data. Koordinasi proteksi sistem eksisting akan dilakukan *resetting* apabila diperlukan. Simulasi kurva batas energi akan dilakukan pada *software*.
4. Analisis Data
Dari analisis data busur api sistem kelistrikan PT. Pupuk Kujang, maka akan diketahui metode mana yang lebih cepat dalam perhitungannya serta penentuan kategori PPE yang perlu digunakan. (NFPA) 70E-2015 digunakan sebagai acuan dasar bahaya busur api.

5. Penyusunan Laporan Tugas Akhir
Tahapan yang terakhir adalah penyusunan laporan Tugas Akhir dan menentukan kesimpulan serta memberikan rekomendasi mengenai *setting* waktu rele pengaman atau rele differensial pada PT. Pupuk Kujang setelah adanya pertimbangan bahaya busur api yang melebihi level 4.

1.6 Sistematika Penulisan

Laporan Tugas Akhir ini disusun menjadi lima bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB 1: Pendahuluan

Menjelaskan tentang latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi atau manfaat penulisan Tugas Akhir.

BAB 2: Dasar Teori

Membahas pengertian *arc flash*, perhitungan *arc flash* sesuai standar IEEE 1584-2002 dan perhitungan *arc flash* dengan metode kurva batas energi.

BAB 3: Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kujang.

Menjelaskan mengenai sistem kelistrikan industri dan spesifikasi beban yang terdapat pada PT. Pupuk Kujang.

BAB 4: Simulasi dan Analisis Data

Bab ini membahas tentang hasil simulasi yang telah dilakukan serta analisis perbandingan besar nilai energi insiden berdasarkan standar IEEE 1584-2002 dengan kurva batas energi pada kondisi ksisting dan *resetting*.

BAB 5: Penutup

Memberikan kesimpulan dan saran dari hasil analisis dan pembahasan yang telah diperoleh.

1.7 Relevansi

Hasil dari Tugas Akhir ini diharapkan nantinya dapat memberikan beberapa manfaat, antara lain:

1. Sebagai referensi PT. Pupuk Kujang dalam penentuan standar PPE untuk pekerja listrik dan koordinasi rele arus lebih.
2. Pengklasifikasian besar energi busur api sesuai dengan perlengkapan pakaian kelesamatan yang diharapkan dapat menghindari korban jiwa dari para pekerja yang ada disekitar.

3. Mampu memudahkan dalam penentuan kategori PPE dalam menanggulangi bahaya busur jika menggunakan kurva batas energi.
4. Dapat digunakan sebagai referensi untuk mahasiswa lain yang akan mengerjakan Tugas Akhir dengan topik atau permasalahan serupa.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

BUSUR API DAN KOORDINASI PROTEKSI SISTEM KELISTRIKAN

2.1 Definisi Busur Api (*Arc Flash*)

Suatu keadaan berbahaya dimana munculnya percikan listrik dalam bentuk plasma dan terjadi pelepasan energi panas disebut dengan busur api atau *arc flash* [1–3]. Busur api akan muncul bila ada arus listrik mengalir pada saluran yang semestinya tidak boleh teraliri seperti antara fasa dengan fasa lainnya, fasa ke netral dan fasa ke tanah [4]. Temperatur dari busur api dapat mencapai 35.000°F (19426.667°C) sehingga dapat membakar pakain dan kulit secara langsung. Konduktor atau bagian saluran listrik ketika sedang dialiri arus, baik dalam kondisi tidak dilindungi (terbuka) maupun dilindungi (tertutup) berpotensi menimbulkan busur api.

Pada table 2.1, dapat diketahui beberapa faktor yang dapat menyebabkan munculnya gangguan busur api.

Tabel 2.1 Tabel faktor penyebab munculnya busur api [4]

Hubung singkat karena:	Kegagalan mekanik.
	Kegagalan isolasi.
	Kesalahan kerja yang dilakukan pada sistem bertegangan.
Percikan akibat peluahan karena:	Tersentuh dengan sistem atau peralatan.
	Terjatuhnya benda atau perkakas di sekitar sistem atau peralatan.
	Kegagalan mekanik seperti ada bagian yang lepas pada sistem atau peralatan.
Penyebab lainnya:	Pertikel kecil berupa debu disekitar
	Pengaratn atau korosi.
	Kondensasi atau pengembunan.
	Tekanan tegangan berlebih pada celah sempit.

Arc Blast merupakan kejadian dimana dipanaskannya konduktor dan udara di sekitar busur hingga menguap dengan waktu yang cepat, menyebabkan meledaknya peralatan, bahan isolasi, dan struktur pendukung lainnya dengan kekuatan tinggi akibat tekanan uap yang muncul [5]. Busur api serta *arc blast* biasanya akan muncul bersamaan dan dapat membahayakan pekerja. Munculnya busur api diawali dengan munculnya arus yang disebut dengan arus *arcing*. Untuk sistem dengan tegangan kurang dari 15 kV, arus *arcing* berbeda dengan arus *bolted* atau arus hubung singkat. Arus *arcing* memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan arus hubung singkat. Selain itu, arus *arcing* juga mengalir pada suatu impedansi yang besar (contohnya celah udara) sehingga menyebabkan munculnya energi panas saat terjadi busur api.

Besarnya energi dari suatu busur api dipengaruhi oleh level tegangan pada sistem. Pada tiap tipe peralatan listrik memiliki jarak konduktor yang mempengaruhi besarnya energi busur api. Selain itu, seberapa cepat rele mengisolasi gangguan atau menghilangkan arus gangguan *arcing* juga mempengaruhi besarnya energi yang dihasilkan [4].

2.2 Penggunaan Standar IEEE 1584-2002 sebagai Dasar Perhitungan Energi Insiden pada Busur Api [3]

Pada perhitungan dengan menggunakan standar IEEE 1584-2002, perlu dicari nilai dari besarnya arus gangguan *arcing* pada tiap bus. Selanjutnya akan dilakukan perhitungan untuk mengetahui besarnya energi insiden yang ada.

2.1.1 Perhitungan Arus Gangguan *Arcing*

Pada perhitungan arus gangguan *arcing*, perlu diketahui tegangan bus yang diteliti. Pada tegangan bus yang kurang dari 1kV, maka dapat digunakan persamaan:

$$\lg I_a = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0,0966 \times V + 0,000526 G + 0,5588 V (\lg I_{bf}) - 0,00304 G (\lg I_{bf}) \quad (2.1)$$

Sedangkan persamaan yang digunakan pada tegangan bus 1kV sampai 15kV untuk mencari arus gangguan *arcing* yaitu:

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \times \lg I_{bf} \quad (2.2)$$

Dari persamaan di atas, selanjutnya akan didapatkan nilai dari arus gangguan *arcing* dari persamaan:

$$I_a = 10^{\lg I_a} \quad (2.3)$$

Dimana simbol-simbol pada persamaan (2.1), (2.2), dan (2.3) mempunyai arti:

\lg	: \log_{10}
I_a	: Arus gangguan <i>arcing</i> (kA)
K	: Konstanta bernilai -0,153 untuk konfigurasi terbuka (no-enclosure) dan bernilai -0,097 untuk konfigurasi kotak (enclosure)
I_{bf}	: Arus gangguan bolted pada gangguan tiga fasa (kA)
V	: Tegangan sistem atau bus (kV)
G	: Jarak celah antar konduktor (mm)

2.1.2 Perhitungan *Incident Energy* atau Energi Insiden

Setelah melakukan perhitungan nilai dari besarnya arus gangguan *arcing*, maka dapat dilakukan perhitungan besarnya energi insiden. Definisi dari energi insiden menurut IEEE 1584 yaitu sejumlah energi yang menyebarkan di suatu permukaan yang dihasilkan selama terjadinya busur api pada jarak tertentu dari sumber busur api. Perhitungan dilakukan berdasarkan data yang dinormalisasi untuk durasi busur api sebesar 0,2 detik dan jarak antara sumber busur api dengan pekerja sejauh 610 mm. Persamaan energi yang dinormalisasi yaitu:

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 \times G \quad (2.4)$$

Dimana nilai E_n didapatkan dari:

$$E_n = 10^{\lg E_n} \quad (2.5)$$

Dimana simbol-simbol pada persamaan (2.4) dan (2.5) mempunyai arti:

E_n	: Energi insiden yang dinormalisasi
I_a	: Arus gangguan <i>arcing</i> (kA)

- K_1 : Konstanta bernilai -0,792 untuk konfigurasi terbuka (*no-enclosure*) dan bernilai -0,555 untuk konfigurasi kotak (*enclosure*)
- K_2 : Konstanta bernilai 0 untuk sistem tidak diketanahkan (*ungrounded*) dan diketanahkan dengan resistansi besar (*high-resistance grounded*) dan bernilai -0,113 untuk sistem yang diketanahkan (*grounded*)
- G : Jarak celah antar konduktor (mm)

Sistem dengan konfigurasi terbuka (*no-enclosure*) memiliki arus *arcing* serta energi insiden yang lebih besar dibandingkan dengan yang konfigurasi kotak karena pada konfigurasi terbuka energi yang terpancarkan akan menyebar. Sedangkan dengan konfigurasi kotak, energi yang terpancarkan akan terkumpul pada kotak dan langsung menyambar pekerja. Selain itu, pentanahan akan berpengaruh pada besarnya energi walaupun arus gangguan yang dilihat adalah gangguan 3 fasa. Setelah mengetahui nilai energi yang dinormalisasi atau E_n didapatkan, maka perlu dilakukan konversi sehingga didapatkan energi insiden yang pada jarak kerja yang telah ditetapkan melalui persamaan:

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2} \right) \times \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (2.6)$$

Dimana simbol-simbol pada persamaan (2.6) mempunyai arti:

- E : Energi insiden (J/cm²)
- C_f : Faktor Pengali yang bernilai 1 untuk tegangan di atas 1 kV dan bernilai 1,5 untuk tegangan di bawah 1kV.
- E_n : Energi insiden yang dinormalisasi
- t : Lama waktu terjadinya busur api (detik)
- D : Jarak kerja atau jarak antara pekerja dengan titik yang dimungkinkan menjadi sumber busur api (mm)
- x : Faktor eksponen jarak antar konduktor

Untuk memenuhi semua parameter dalam perhitungan, dapat melihat pada tabel 2.2. Parameter yang telah ditetapkan berdasarkan IEEE 1584 tahun 2002 meliputi celah antar konduktor (G), faktor eksponen jarak antar konduktor (x), dan jarak kerja (D). Mengenai nilai dari parameter yang telah disebutkan adalah sebagai berikut:

Tabel 2.2 Tabel data parameter yang dibutuhkan untuk menghitung energi insiden

Level Tegangan (kV)	Jenis Peralatan	Jarak celah antar konduktor (mm)	Faktor Eksponen Jarak antar konduktor
0,208 – 1	Udara terbuka	10–40	2
	<i>Switchgear</i>	32	1,473
	MCC dan panel	25	1,641
	Kabel	13	2
> 1 – 5	Udara terbuka	102	2
	<i>Switchgear</i>	13–102	0,973
	Kabel	13	2
>5 – 15	Udara terbuka	13–153	2
	<i>Switchgear</i>	153	0,973
	Kabel	13	2

Tabel 2.3 Tabel data parameter yang dibutuhkan untuk menghitung energi insiden

Tegangan	Jenis Peralatan	Jarak kerja (mm)
600 V	MCC dan panel	455
	<i>Switchgear</i>	610
	Kabel	455
Di atas 600 V	<i>Switchgear</i>	910
	Kabel	455
Lainnya		Ditentukan di lapangan

Ketika level tegangan berada di atas 15kV, maka untuk menghitung energi insiden dapat menggunakan metode Lee.

$$E = 2,142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{D^2} \right) \quad (2.7)$$

Peralatan yang digunakan dalam sistem kelistrikan PT. Pupuk Kujang menggunakan *switchgear* pada tegangan 2,4 kV dan 13,8 kV. Tegangan menengah pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Kujang tidak melebihi tegangan 15 kV, sehingga tidak diperlukan penggunaan metode Lee.

2.3 Metode Perhitungan Busur Api dengan Kurva Batas Energi [6]

Energi insiden didefinisikan sebagai kemunculan sejumlah energi pada permukaan pada saat terjadinya busur listrik dengan jarak tertentu dari sumber busur listrik tersebut [3]. Pada tegangan menengah suatu sistem kelistrikan, besarnya energi insiden suatu busur api dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.6) yang telah dipaparkan sebelumnya. Pada persamaan tersebut, dapat diketahui bahwa nilai E_n akan bergantung pada besarnya arus gangguan *bolting* yang muncul pada lokasi atau bus yang diteliti. Selain itu, karakteristik dari peralatan proteksi arus lebih (OCPD) pada bagian *upstream* atau yang bertugas mengamankan bus pada saat gangguan juga akan mempengaruhi t atau lama waktu gangguan *arcing*. Dari persamaan (2.6), dapat ditulis ulang sebagai berikut:

$$t = \frac{E}{A_1 E_n} \quad (2.8)$$

Dimana A_1 merupakan suatu konstanta yang didapatkan dari:

$$A_1 = 4,184 \times \left(\frac{C_f}{0,2} \right) \times \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (2.9)$$

Energi insiden yang dinormalisasi dirumuskan oleh IEEE 1584 pada persamaan (2.4). Pada persamaan tersebut didapatkan beberapa konstanta yaitu konstanta K_1 yang bernilai -0,792 untuk konfigurasi terbuka dan bernilai -0,555 untuk konfigurasi kotak. Selanjutnya yaitu konstanta K_2

yang akan bernilai 0 untuk sistem yang tidak diketanahkan (*ungrounded system*) atau yang memiliki sistem pentanahan dengan nilai resistansi yang tinggi (*high-resistance grounded system*) dan bernilai -0,113 untuk sistem yang diketanahkan (*grounded system*). Kemudian I_a yang merupakan arus gangguan *arcing* dalam satuan kA. Dan yang terakhir yaitu G yang merupakan jarak antar konduktor pada peralatan dalam satuan milimeter. Untuk menggabungkan persamaan (2.4) kedalam persamaan (2.8), maka konstanta yang ada pada persamaan (2.4) dapat ditulis ulang sebagai berikut:

$$A_2 = K_1 + K_2 + 0,0011 \times G \quad (2.10)$$

$$A'_2 = 10^{A_2} \quad (2.11)$$

A_2 dan A'_2 dianggap sebagai suatu konstanta. Maka persamaan (2.4) dapat digabungkan ke persamaan (2.8) menjadi:

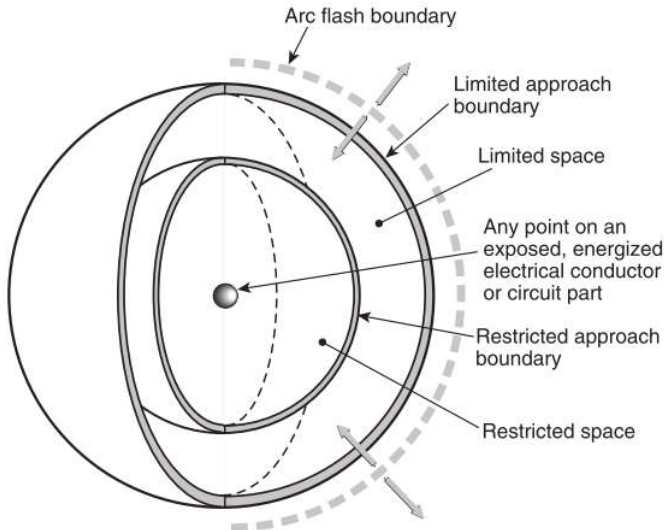
$$t = \frac{E}{A_1 \times A'_2 \times I_a^{1,081}} \quad (2.12)$$

Dari persamaan (2.12), jika semua konstanta telah didapatkan sesuai dengan konfigurasi dari sistem dan nilai dari energi insiden yang didapatkan berdasarkan kategori PPE, maka persamaan (2.12) dapat digunakan untuk menentukan titik-titik pada kurva hubungan arus terhadap waktu yang sesuai dengan level insiden yang dipilih. Persamaan (2.12) dapat diterapkan pada yang bersesuaian dengan metode IEEE 1584-2002, yaitu pada sistem tiga fasa di level tegangan 208 V sampai 15 kV dan dengan arus gangguan *bolted* pada kisaran 700 A sampai 106 kA.

2.4 Jarak Batas Aman Busur Api [5]

Pada NFPA 70 E tahun 2015 dijelaskan tentang batas-batas pendekatan (*limits of approach*) yaitu suatu zona berbentuk bola yang memiliki jarak batasan tertentu dan peraturan tertentu jika berada di zona tersebut. Di dalam zona batas-batas pendekatan, terdapat zona jarak batas aman busur api (*arc flash boundary*), yaitu sebuah pendekatan mengenai batas dimana seorang atau pekerja akan menerima luka bakar tingkat dua jika terpapar busur api. Jika seseorang berada di dalam zona jarak batas

aman busur api, maka orang tersebut dapat dipastikan akan menderita luka bakar tingkat kedua jika busur api terjadi.



Gambar 2.1 Ilustrasi Zona Batas-Batas Pendekatan (*Limits of Approach*) [5]

Selain terdapat zona jarak batas aman busur api, terdapat dua zona lain yang berada di dalamnya, diantaranya yaitu:

a. *Limited approach boundary*

Limited approach boundary atau batas jarak pendekatan terbatas merupakan suatu zona yang terbatas untuk didekati oleh orang atau pekerja dari konduktor atau bagian sirkuit yang bertegangan karena ada bahaya kejutan listrik di zona tersebut.

b. *Restricted approach boundary*

Restricted approach boundary atau batas jarak terlarang merupakan suatu zona yang terbatas untuk didekati oleh orang atau pekerja dimana di zona ini peluang untuk tersengat listrik lebih tinggi dari zona sebelumnya bila terjadi busur api disertai gerakan yang tidak disengaja oleh orang atau pekerja.

Menurut standar IEEE 1584-2002, jarak batas aman busur api dapat dicari melalui rumus empiris di bawah ini:

$$D_B = \sqrt[x]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)} \quad (2.13)$$

Untuk energi insiden yang dicari dengan metode Lee:

$$D_B = \sqrt[2,142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{E_B}\right)]{} \quad (2.14)$$

Dimana simbol-simbol pada persamaan (2.13) dan (2.14) mempunyai arti:

E_B : Energi insiden (J/cm^2) pada jarak batas busur api, yaitu sebesar $5 J/cm^2$

C_f : Faktor Pengali yang bernilai 1 untuk tegangan di atas 1 kV dan bernilai 1,5 untuk tegangan di bawah 1kV.

E_n : Energi insiden yang dinormalisasi

I_{bf} : Arus gangguan *boltd* (kA)

V : Tegangan bus (kV) E_B

t : Lama waktu terjadinya busur api (detik)

D_B : Jarak aman antara pekerja dengan titik yang dimungkinkan menjadi sumber busur api (mm)

x : Faktor eksponen jarak antar konduktor

Pada metode kurva batas energi tidak akan didapatkan nilai dari energi insiden serta FCT, namun energi insiden maksimum tiap bus dapat diketahui. Tetapi, dari metode IEEE masih bisa dihitung jarak batas aman busur api maksimum pada tiap level PPE yang ada [6]. Dari persamaan (2.6), jika tingkat energi insiden dianggap (E_{WD}) pada jarak kerja (D_{WD}) maka:

$$E_{WD} = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D_{WD}^x}\right) \quad (2.15)$$

Dan energi insiden (E_B) pada jarak batas busur api (D_B) adalah:

$$E_B = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D_B^x}\right) \quad (2.16)$$

Dengan menggabungkan persamaan (2.15) dan (2.16), maka jarak aman tiap kategori PPE dapat dicari dengan:

$$\frac{E_B}{E_{WD}} = \left(\frac{D_B}{D_{WD}} \right)^{-x} \quad (2.17)$$

$$D_B = \frac{D_{WD}}{\sqrt[x]{\frac{E_B}{E_{WD}}}} \quad (2.18)$$




Untuk sistem dengan tegangan lebih dari 15kV, x pada persamaan (2.18) diganti dengan nilai 2.

2.5 *Personal Protective Equipment (PPE)* atau Alat Pelindung Diri (APD) Sesuai dengan Standar NFPA 70E-2015 [5]


Penentuan jenis PPE apa yang harus digunakan oleh pekerja dilakukan setelah menggambarkan kurva karakteristik rele dan kurva batas energi. PPE yang diperlukan diklasifikasikan berdasarkan kategori bahaya busur api dari level 1 sampai level 4. Untuk bahaya busur api level 0 tidak lagi dicantumkan pada NFPA 70E tahun 2015 karena level 0 dianggap tidak memiliki bahaya busur api dan PPE terbaru hanya diperuntukan bila pekerja berada pada jarak batas aman busur api. Pada NFPA 70E tahun 2015, perlengkapan perlindungan diharuskan memenuhi syarat tahan busur api, tidak lagi memakai syarat tahan api.

Berikut adalah tabel PPE lainnya sesuai dengan tingkat bahaya yang ada:

Tabel 2.4 Kategori *personal protective equipment* (PPE)

Kategori Bahaya	Energi Insiden (E) minimal PPE (Cal/cm ²)	PPE	Bentuk PPE
1	4	<ul style="list-style-type: none"> • Pakaian tahan busur api (lihat catatan 1) • Perlengkapan perlindungan (lihat catatan 2) 	
2	8	<ul style="list-style-type: none"> • Pakaian tahan busur api (lihat catatan 1) dilengkapi dengan <i>balaclava</i> (topeng ski) • Perlengkapan perlindungan (lihat catatan 2) 	
3	25	<ul style="list-style-type: none"> • Memakai semua pakaian tahan busur api (lihat catatan 1) dilengkapi dengan jas (jaket dan celana) tahan busur api • Perlengkapan perlindungan (lihat catatan 2) 	

Tabel 2.4 Kategori *personal protective equipment* (PPE) (lanjutan)

Kategori Bahaya	Energi Insiden (E) minimal PPE (Cal/cm ²)	PPE	Bentuk PPE
4	40	<ul style="list-style-type: none"> • Memakai semua pakaian tahan busur api (lihat catatan 1) dilengkapi dengan jas (jaket dan celana) tahan busur api • Perlengkapan perlindungan (lihat catatan 2) 	
Kategori bahaya dengan energi insiden dibawah 1,2 cal/cm ²	-	<ul style="list-style-type: none"> • Memakai pakaian pelindung yang tidak mudah meleleh serta berserat alami (baju lengan panjang, celana panjang atau baju <i>coverall</i>) • Perlengkapan perlindungan (lihat catatan 2) 	

Catatan 1:

1. Baju lengan panjang dan celana panjang atau menggunakan baju *coverall* (memakai salah satu, kecuali untuk kategori 3 dan 4)
2. Pelindung muka atau tudung tahan busur api
3. Jaket, parka, jas hujan atau pelindung dalam helm

Catatan 2:

1. Pelindung kepala seperti helm pelindung atau topi keras
2. Pelindung pendengaran seperti sumbatan pendengaran (*ear plug*) atau penutup telinga (*earmuff*)
3. Sarung tangan lapangan atau *heavy duty*
4. Sepatu pelindung berbahan kulit

2.6 Gangguan pada Sistem Kelistrikan

2.6.1 Gangguan Beban Lebih (*Overload*)

Gangguan beban lebih adalah gangguan yang ditimbulkan oleh peralatan yang dioperasikan melebihi *rating*, akibatnya arus yang mengalir lebih besar dibandingkan dengan arus nominal peralatan.

2.6.2 Gangguan Hubung Singkat (*Short Circuit*)

Gangguan hubung singkat dapat dikelompokkan menjadi 2 jenis, yaitu hubung singkat simetri dan hubung singkat asimetri. Gangguan yang termasuk ke dalam hubung singkat simetri adalah gangguan hubung singkat tiga fasa. Sementara yang termasuk hubung singkat asimetri adalah gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, hubung singkat dua fasa, hubung singkat dua fasa ke tanah, dan hubung singkat tiga fasa ke tanah [7].

2.6.3 Perhitungan Arus Hubung Singkat

Perhitungan praktis untuk menghitung besarnya arus hubung singkat pada sistem tenaga listrik dilakukan sebagai berikut [8]:

- **Hubung Singkat Tiga Fasa**

Pada jenis ini, ketiga fasa yang ada saling terhubung satu sama lainnya (R-S-T). Arus hubung singkat tiga fasa ($I_{sc3\phi}$) dapat dihitung dari persamaan berikut:

$$I_{sc3} = \frac{V_{LL}/\sqrt{3}}{X_1} \quad (2.19)$$

- **Hubung Singkat Dua Fasa atau Antar Fasa**

Pada jenis ini, dua fasa saling terhubung (R-S atau S-T atau T-R) tanpa terhubung dengan tanah. Melibatkan arus hubung singkat urutan negatif (X_2). Arus hubung singkat fasa ($I_{sc2\phi}$) dapat dihitung dari persamaan berikut:

$$I_{sc2} = \frac{V_{LL}}{X_1 + X_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{sc3} \approx 0.86 I_{sc3} \quad (2.20)$$

- **Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah**

Pada jenis ini, salah satu fasa terhubung dengan tanah. Melibatkan impedansi urutan negatif (X_2) dan imoedansi urutan nol (X_0). Arus hubung singkat fasa (I_{sc0}) dapat dihitung dari persamaan berikut:

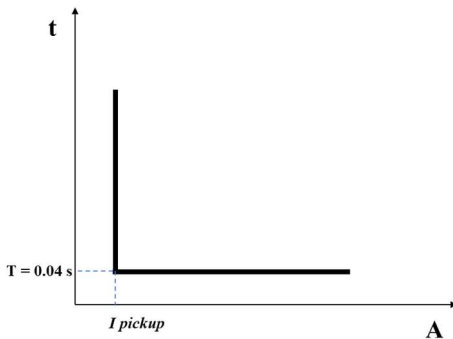
$$I_{sc0} = \frac{3 \times V_{LN}}{X_1 + X_2 + X_0} \quad (2.21)$$

2.7 Rele Arus Lebih Gangguan Fasa (*Phase Over Current Relay*)

Rele arus lebih gangguan fasa merupakan jenis rele yang akan bekerja jika arus yang mengalir melewati batas yang telah ditetapkan, baik karena arus beban berlebih (*overload*) maupun arus gangguan hubung singkat [9]. Berdasarkan karakteristik waktunya, rele arus lebih gangguan fasa dibagi menjadi tiga jenis, yaitu rele arus lebih waktu instan, rele arus lebih waktu tertentu (*definite*), dan rele arus lebih *inverse*.

2.7.1 Rele Arus Lebih Waktu Instan (*Instantaneous Overcurrent Relay*)

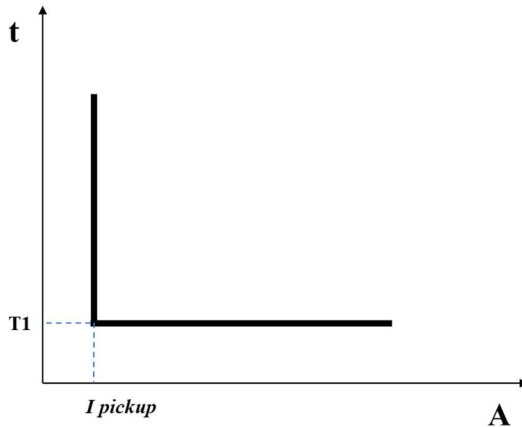
Rele jenis ini dapat beroperasi waktu cepat, yaitu berkisar 0,5 *cycle* sampai 2 *cycle* atau 0,01 detik hingga 0,04 detik jika terjadi gangguan [9].



Gambar 2.2 Gambar karakteristik kurva rele waktu instan

2.7.2 Rele Arus Lebih Waktu Tertentu (*Definite Time Overcurrent Relay*)

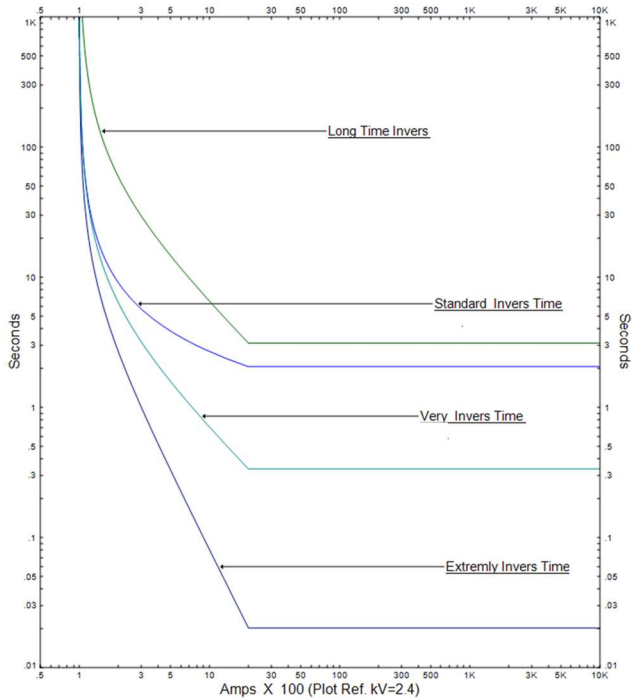
Rele arus lebih waktu tertentu akan bekerja jika arus yang mengalir melebihi arus *pickup* minimum pada waktu *delay* yang telah ditetapkan. Waktu operasi dari rele ini dapat diatur [9].



Gambar 2.3 Gambar karakteristik kurva rele waktu tertentu

2.7.3 Rele Arus Lebih Waktu Invers (*Invers Time Overcurrent Relay*)

Rele arus lebih akan bekerja ketika arus yang mengalir melalui rele melebihi arus pickupnya. Karakteristik rele *inverse* adalah waktu operasi berbanding terbalik dengan besarnya arus. Waktu operasi dari rele jenis ini akan semakin cepat jika arus gangguan yang dideteksi besar, dan sebaliknya [9].



Gambar 2.4 Gambar karakteristik kurva rele waktu invers

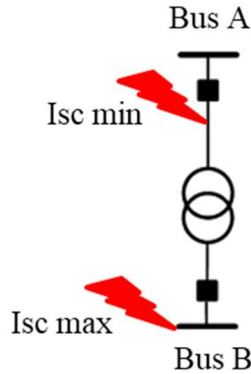
2.8 Pengaturan Rele Arus Lebih Gangguan Fasa

2.8.1 Pengaturan Rele Arus Lebih Waktu Instan

Rele arus lebih waktu instan akan beroperasi jika arus yang dideteksi melewati CT (*current transformer*) melewati batas yang diizinkan atau arus *pickup*. Dalam penentuan arus *pickup* digunakan arus hubung singkat minimum ($I_{sc\ min}$) yang merupakan arus hubung singkat dua fasa pada waktu hubung singkat 30 *cycle* pada pembangkitan minimum, dimana tidak ada lagi arus kontribusi dari beban. Sehingga pengaturan rele arus lebih instan ditetapkan:

$$I_{set} \leq 0.8 \times I_{sc\ min} \quad (2.22)$$

Pada permasalahan khusus yaitu untuk pengamanan pada penyulang yang dipisahkan oleh transformator, maka ada pertimbangan khusus yang harus dilakukan.



Gambar 2.5 Gambar Rele arus lebih pada pengamanan transformator

Koordinasi rele pengamanan seperti pada gambar 2.5 dibedakan menjadi dua bagian, yaitu bagian tegangan rendah (LV) pada bus B dan bagian tegangan tinggi (HV) pada bus A. $I_{sc\ max}$ pada bus B merupakan nilai arus hubung singkat tiga fasa pada waktu $\frac{1}{2}$ cycle, sedangkan $I_{sc\ min}$ pada bus A merupakan nilai arus hubung singkat dua fasa pada waktu 30 cycle. Untuk menentukan pengaturan yang tepat pada *pickup* pada bagian tegangan tinggi, maka harus memenuhi syarat:

$$I_{sc\ max\ bus\ B} \leq I_{set} \leq 0.8 \times I_{sc\ min\ bus\ A} \quad (2.23)$$

2.8.2 Pengaturan Rele Arus Lebih Waktu *Inverse*

Rele arus lebih waktu *inverse* harus diatur agar dapat beroperasi ketika terjadi gangguan beban lebih. Pengaturan arus *pickup* pada rele ditentukan berdasarkan pemilihan *tap* yang dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$Tap = \frac{I_{set}}{Primer\ CT} \quad (2.24)$$

Atau

$$Tap = \frac{Iset \times Sekunder CT}{Primer CT} \quad (2.25)$$

Keterangan:

Iset : arus *pickup* rele

Primer CT : belitan primer transformator arus

Sekunder CT : belitan sekunder transformator arus

Untuk menghitung *time dial*, dapat digunakan rumus sebagai berikut:

$$top = \frac{k \times TDS}{\beta \times \left[\left(\frac{I}{Iset} \right)^\alpha - 1 \right]} \quad (2.26)$$

Keterangan:

top : waktu operasi rele (detik)

TDS : *Time Dial Setting*

I : arus gangguan yang mengalir melalui rele (Ampere)

Iset : arus *pickup* rele (Ampere)

k, α , β : koefisien kurva inverse

Tabel 2.5 Koefisien kurva rele *inverse*

Jenis Kurva	Koefisien		
	k	α	β
<i>Standard Inverse</i>	0,14	0,02	2,97
<i>Very Inverse</i>	13,5	1	1,5
<i>Long Time Inverse</i>	120	1	13,33
<i>Extremely Inverse</i>	80	2	0,808
<i>Ultra Inverse</i>	315,2	2,5	1

2.8.3 Koordinasi Berdasarkan Interval Waktu [9]

Antara rele pengaman utama dan rele pengaman *backup* tidak boleh beroperasi secara bersamaan ketika terjadi gangguan. Untuk itu diperlukannya perbedaan waktu buka antara keduanya. Koordinasi waktu interval (CTI) dari waktu operasi rele utama ($top_{primary}$) dan waktu operasi rele *backup* (top_{backup}) dapat diketahui melalui persamaan berikut:

$$CTI = top_{primary} - top_{backup} \quad (2.27)$$

Menurut IEEE Std 242, terdapat rekomendasi CTI minimum untuk jenis rele tertentu, rinciannya sebagai berikut:

Tabel 2.6 CTI rele

Komponen	Waktu (detik)	
	Elektromekanik	Statik
Waktu pembukaan <i>circuit breaker</i> (2-5 cycle)	0,04-0,1	
<i>Overtravel</i> pada rele	0,1	0
Toleransi dan <i>error</i> pada rele	0.12	

Sehingga dapat disimpulkan bahwa CTI minimum yang direkomendasikan adalah berkisar 0,26-0.32 detik untuk rele elektromekanik dan 0,16-0.22 detik untuk rele statik. Untuk CTI minimum antara rele utama dan rele *backup* yaitu antara 0,2 detik sampai 0,3 detik.

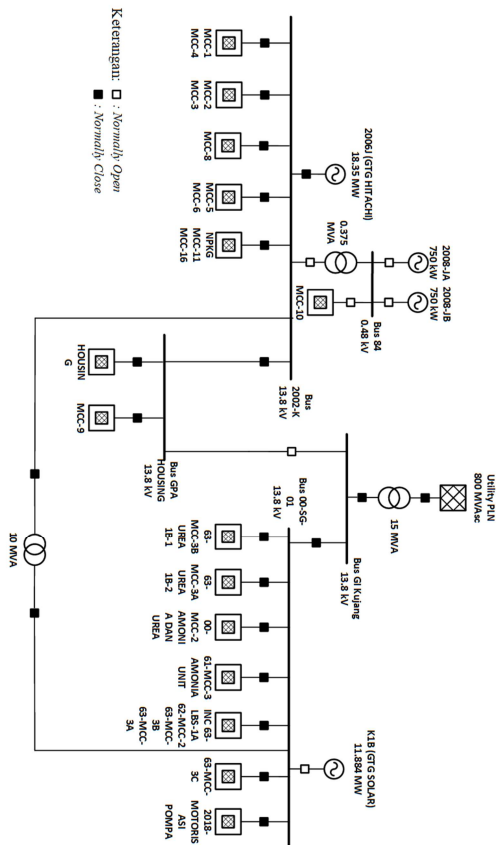
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

SISTEM KELISTRIKAN PT. PUPUK KUJANG

3.1 Kelistrikan PT. Pupuk Kujang

PT. Pupuk Kujang merupakan pabrik penghasil pupuk yang terletak di daerah Cikampek, Jawa Barat. PT. Pupuk Kujang mempunyai dua pabrik yaitu pabrik K-1A dan K-1B dengan total beban 14,818 MW. Saat ini system kelistrikan PT. Pupuk Kujang disuplai satu buah generator jenis generator turbin gas dan *utility* dari PLN. Sistem kelistrikan tersebut dapat dilihat pada gambar 3.1



Gambar 3.1 Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kujang

3.2 Data Kelistrikan pada PT. Pupuk Kujang

Dalam kondisi operasi normal, jumlah total *demand* pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Kujang saat ini sebesar 14,818 MW dan 10,674 Mvar. Untuk rincian pembangkitan, pembebanan, dan *demand* dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Rangkuman jumlah pembangkitan, pembebanan, dan *demand*

Keterangan	MW	Mvar	MVA	%PF
Sumber (<i>Swing Buses</i>)	5,032	2,984	5,85	86,02 lag
Sumber (<i>Non-Swing Buses</i>)	10,5	6,507	12,353	85 lag
Total <i>Demand</i>	15,532	9,491	18,202	85,33 lag
Total <i>Motor Load</i>	11,655	6,052	13,133	88,75 lag
Total <i>Static Load</i>	0,058	0,044	0,073	80 lag
Total <i>Lump Load</i>	3,537	2,472	4,315	81,97 lag
<i>Apparent Losses</i>	0,122	0,855		

3.3 Kapasitas Pembangkit di PT. Pupuk Kujang

Dalam memenuhi kebutuhan beban, sistem kelistrikan PT. Pupuk Kujang mengandalkan suplai daya dari generator yang dimilikinya dan juga suplai daya dari *grid* PLN. Terdapat satu generator aktif yang menyuplai sistem dalam keadaan normal. Data kapasitas pembangkit untuk generator dapat dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Data kapasitas pembangkit di PT. Pupuk Kujang

Spesifikasi	GTG Hitachi (2006 J)
Rating Kapasitas	18,35 MW
Daya Mampu	10.5 MW
Tegangan	13,8 kV
Frekuensi	50 Hz
%PF	85%
<i>FLA</i>	903,2 A
<i>RPM</i>	3000
Tipe <i>Exciter</i>	1
Tipe <i>Governor</i>	2301

Tabel 3.2 Data kapasitas pembangkit di PT. Pupuk Kujang (lanjutan)

Spesifikasi	GTG Hitachi (2006 J)
<i>Direct axis synchronous reactance (X_d)</i>	110
<i>Direct axis transient reactance (X_d')</i>	23
<i>Direct axis sub-transient reactance (X_d'')</i>	12
<i>Negative sequence reactance (X_2)</i>	12
<i>Zero sequence reactance (X_0)</i>	12
<i>Quadrature axis synchronous reactance (X_q)</i>	108
<i>Quadrature axis transient reactance (X_q')</i>	15
<i>Quadrature axis sub-transient reactance (X_q'')</i>	12
<i>Transient direct axis open circuit transient (T_{do}')</i>	5,6
<i>Transient direct axis open circuit transient (T_{do}'')</i>	0.002

3.4 Sistem Distribusi di PT. Pupuk Kujang

Dalam pendistribusian tenaga listriknya, PT. Pupuk Kujang menggunakan jaringan semi radial. Jaringan kelistrikan PT. Pupuk Kujang bukan merupakan jaringan radial murni dikarenakan hampir semua pabrik telah terinterkoneksi dan tersuplai lebih dari satu sumber daya.

Sistem kelistrikan PT. Pupuk Kujang memiliki beberapa nilai tegangan yang berbeda dalam distribusi tenaga listriknya, diantaranya adalah 13.8 kV, 2.4 kV, 0.48 kV, 0.48 kV, dan 0.4 kV. Untuk menghubungkan jaringan kelistrikan tersebut, PT. Pupuk Kujang menggunakan trafo *step-up*, trafo *step-down*, dan trafo isolasi. Data untuk masing-masing trafo yang digunakan oleh PT. Pupuk Kujang dapat dilihat pada tabel 3.3.

Tabel 3.3 Data tranformator pada PT. Pupuk Kujang

ID	Terhubung		Tegangan (kV)	Kapasitas (MVA)
	Dari Bus	Ke Bus		
00-TR-2	Bus2	00-MCC-2	13,8 / 2,4	6
61-TR-3	Bus6	61-MCC-3	13,8 / 0,4	1,25
62-TR-3A	Bus8	62-MCC-3A	13,8 / 0,4	1,6
62-TR-3B	Bus7	62-MCC-3B	13,8 / 0,4	1,6
63-TR-2	Bus3	62-MCC-2	13,8 / 2,4	6
63-TR-3A	Bus5	63-MCC-3A	13,8 / 0,4	1,6
63-TR-3B	Bus4	63-MCC-3B	13,8 / 0,4	1,6
63-TR-3C	Bus38	63-MCC-3C	13,8 / 0,4	1
T4	Bus1133	Bus1134	13,8 / 13,8	10
TR-1	Bus56	MCC-1	13,8 / 0,48	1,25
TR-2	Bus56	MCC-2	13,8 / 0,48	1,25
TR-3	Bus57	MCC-3	13,8 / 2,4	2,5
TR-4	Bus53	MCC-3	13,8 / 2,4	2,5
TR-5	Bus64	MCC-5	13,8 / 0,48	1,25
TR-6	Bus65	MCC-6	13,8 / 0,48	1,25
TR-8	Bus81	MCC-8	13,8 / 2,4	7,5
TR-9	Bus73	MCC-9	13,8 / 0,48	1,25
TR-11	Bus68	MCC-11	13,8 / 0,48	1,25
TR-14	Bus75	Bus79	13,8 / 0,48	1
TR-15	Bus67	Bus NPKG	13,8 / 0,48	1,25
TR-16	Bus74	Bus77	13,8 / 0,38	0,5
TR-18	Bus76	Bus80	13,8 / 0,38	0,5
TR-MTR POMPA	Bus1	MCC- POMPA	13,8 / 2,4	4
TR-PLN	Bus78	GI KUJANG	150 / 13,8	15
TR-TOYO	Bus82	MCC-TOYO	2,4 / 0,48	2,5
TRP-1	Bus105	Bus112	13,8 / 0,4	0,63
TRP-2	Bus103	Bus110	13,8 / 0,4	0,63
TRP-3	Bus109	Bus116	13,8 / 0,4	0,63
TRP-4	Bus108	Bus115	13,8 / 0,4	0,63

Tabel 3.3 Data tranformator pada PT. Pupuk Kujang (lanjutan)

ID	Terhubung		Tegangan (kV)	Kapasitas (MVA)
	Dari Bus	Ke Bus		
TRP-5	Bus107	Bus114	13,8 / 0,4	0,63
TRP-6	Bus106	Bus113	13,8 / 0,4	0,63

3.5 Sistem Pengaman Arus Lebih PT. Pupuk Kujang

Pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Kujang, digunakan rele arus lebih gangguan fasadengan beberapa manufaktur yang berbeda. Berikut merupakan detail dari rele arus lebih gangguan fasa pada PT. Pupuk Kujang yang akan dibahas pada tugas akhir ini:

1. Westinghouse CO Series [10]

Phase Overcurrent

Pickup Range : 0,5 – 12 x CT ($I_{\text{primer}} \text{ CT} \times I_{\text{sekunder}} \text{ CT}$)

Curve type :

- CO-2 (*Shirt Time*)
- CO-5 (*Long Time*)
- CO-6 (*Definite Minimum Time*)
- CO-7 (*Moderately Inverse Time*)
- CO-8 (*Inverse Time*)
- CO-9 (*Very Inverse Time*)
- CO-11 (*Extremely Inverse Time*)

Time Dial : 0,5-11

Step : 0,5

Instantaneous

Pickup Range : 2 – 160 x CT (*step* = 1)

Delay Range : Instan (0 sec)

2. GE Multilin 489 Series [11]

Phase Overcurrent

Pickup Range : 0,15-20 x CT ($I_{\text{primer}} \text{ CT}$)

Curve type :

- *Definite Time*
- *IEC* : A, B, C, *Short Inverse Time*.

- *ANSI: Normally Inverse, Moderately Inverse, Very Inverse, Extremely Inverse.*
- *IAC : Inverse, Short Time, Very Inverse, Extremely Inverse.*

Time Dial : 0-999,99
Step : 0,01

Instantaneous

Pickup Range : 0,15 – 20 x CT (*step* = 0,01)
Delay Range : 0-100 sec (*step* = 0,01)

3. Merlin Gerin Sepam 40 Series [12]

Phase Overcurrent

Pickup Range : 0,1 – 2,4 x I_N (IDMT)
 0,1 – 24 x I_N (Definite Time)

Curve type :

- *Definite Time, Standard Inverse Time, Long Time Inverse, Very Inverse Time, Extremely Inverse, Ultra Inverse Time, RI Curve*
- *IEC: Standard Inverse Time, Very Inverse Time, Extremely Inverse Time.*
- *IEEE: Moderately Inverse, Very Inverse, Extremely Inverse.*
- *IAC: Inverse, Very Inverse, Extremely Inverse.*

Time Dial : 0,1-12,5
Step : 0,01

Instantaneous

Pickup Range : 0,1 – 24 x I_N (*step* = 0,1)
Delay Range : 0,05-300 sec (*step* = 0,01)

4. ABB SPAM 150C Series [13]

Phase Overcurrent

Pickup Range : 0,05 – 2,4 x I_N

Curve type :

- *Definite Time.*

Time Dial : 0,3-80
Step : 0,1

5. ABB REF 542plus Series [14]

Phase Overcurrent

Pickup Range : $0,05 - 40 \times I_N$

Step : 0,1

Curve type :

- *Definite Time, Standard Inverse Time, Long Time Inverse, Very Inverse Time, Extremely Inverse, Ultra Inverse Time*

Time Dial : 0,1-12,5

Step : 0,01

Instantaneous

Pickup Range : $0,05 - 40 \times I_N$ (step = 0,1)

$0,1 - 40 \times I_N$ (step = 0,1)

Delay Range : 0,015-30 sec (step = 0,01)

6. ABB SPAJ140C (SPCJ4D29) Series [15]

Phase Overcurrent

Pickup Range : $0,5 - 5 \times I_N$ (Definite Time)

$0,5 - 2,5 \times I_N$ (Inverse Time)

Step : 0,01

Curve type :

- *Definite Time*
- *IEC : Normal Inverse Time, Long-Time Inverse, Very Inverse Time, Extremely Inverse Time*
- *RI-type Inverse, RXIDG-type Inverse*

Time Dial : 0,05-1

Step : 0,01

Instantaneous

Pickup Range : $0,05 - 40 \times I_N$ (step = 0,1)

Delay Range : 0,04-30 sec (step = 0,01)

7. Mitsubishi COC3 Series [16]

Phase Overcurrent

Pickup Range : $1 - 12 \times CT$ ($I_{\text{primer}} CT \times I_{\text{sekunder}} CT$)

Step : 0,1

Curve type :

- *Definite Time, Normal Inverse Time, Long Inverse Time, Very Inverse Time, Extremely Inverse Time.*

Time Dial : 0,25-50

Step : 0,25

Instantaneous

Pickup Range : $2 - 80 \times I_N$ (step = 1)

Delay Range : 0,1-0,5 sec (step = 0,1)

8. Siemens 7SJ61 Series [17]

Phase Overcurrent

Pickup Range : CT 1 A = $0,1 - 4 \times CT (I_{\text{primer}} CT \times I_{\text{sekunder}} CT)$ (step = 0,01)

CT 5 A = $0,5 - 20 \times CT$ (step = 0,05)

Curve type :

- *Definite Time*
- *IEC: Normal Inverse, Long Inverse, Very Inverse, Extremely Inverse.*
- *ANSI: Inverse, Definite Inverse, Short Inverse, Long Inverse, Moderately Inverse, Very Inverse, Extremely Inverse.*

Time Dial : 0,05-3.2

Step : 0,01

Instantaneous

Pickup Range : CT 1 A = $0,1 - 35 \times CT$ (step = 0,01)

CT 5 A = $0,5 - 175 \times CT$ (step = 0,05)

Delay Range : 0-60 sec (step = 0,01)

9. Siemens 7SJ61 Series [17]

Phase Overcurrent

Pickup Range : CT 1 A = $0,1 - 4 \times CT (I_{\text{primer}} CT \times I_{\text{sekunder}} CT)$

CT 5 A = $0,5 - 20 \times CT$

Step : 0,01

Curve type :

- *Definite Time*
- *IEC: Normal Inverse, Long Inverse, Very Inverse, Extremely Inverse.*

- *ANSI: Inverse, Definite Inverse, Short Inverse, Long Inverse, Moderately Inverse, Very Inverse, Extremely Inverse.*

Time Dial : 0,05-3.2

Step : 0,01

Instantaneous

Pickup Range : CT 1 A = 0,1 – 35 x CT (*step* = 0,01)

CT 5 A = 0,5 – 175 x CT (*step* = 0,05)

Delay Range : 0-60 sec (*step* = 0,01)

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS DATA

4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kujang

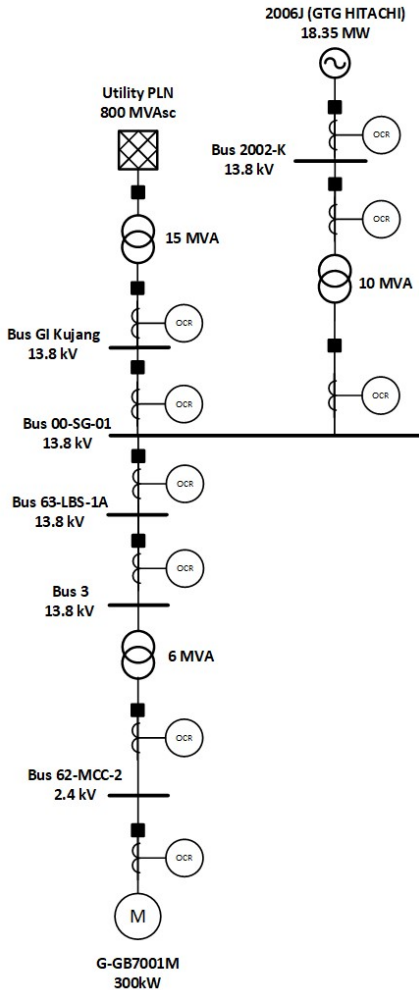
Pemodelan sistem kelistrikan pada PT. Pupuk Kujang dilakukan menggunakan *software* ETAP 12.6.0 dengan menggambarkan *single line diagram* berdasarkan data-data kelistrikan PT. Pupuk Kujang yang telah diperoleh berupa data motor, tranfo, PLN, bus, rele dan *circuit breaker* pada tegangan menengah. Pemodelan sistem kelistrikan ini bertujuan untuk mengetahui kondisi eksisting kelistrikan perusahaan.

Langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi hubung singkat tiga fasa (hubung singkat maksimum) dan hubung singkat antar fasa (hubung singkat minimum) yang bertujuan untuk mengetahui besar arus yang melewati tiap bus dan juga menganalisis bahaya busur api yang dilakukan dengan menyimulasikan busur api untuk mengetahui nilai insidem energi yang terjadi, kategori *personal protective equipment* (PPE), jarak aman perlindungan, dan rekomendasi untuk mengurangi bahaya busur api. Setelah itu, dilakukan analisis pada rele pengamanan eksisting dan melakukan koordinasi ulang pada rele pengamanan.

4.2 Pemilihan Tipikal Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Kujang

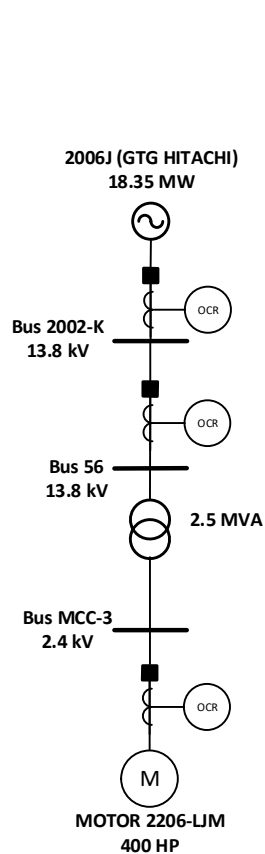
Dalam Tugas Akhir ini, analisis pada pengamanan dilakukan terlebih dahulu pada bagian jaringan interkoneksi tegangan menengah sistem kelistrikan PT. Pupuk Kujang. Untuk itu, diperlukan pemilihan tipikal yang akan dikerjakan. Beberapa tipikal yang dipilih antara lain:

Tipikal 1



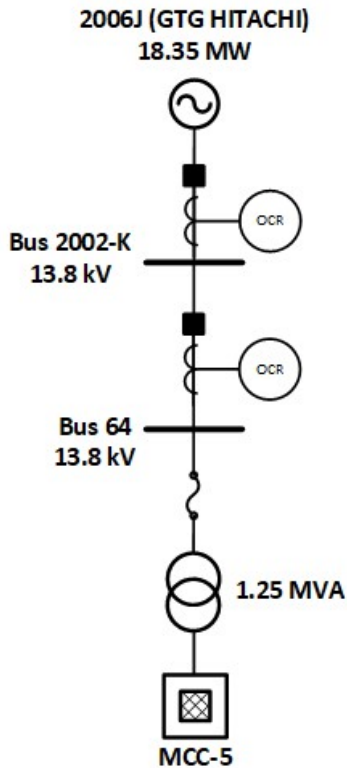
Gambar 4.1 Tipikal 1 PT. Pupuk Kujang

Tipikal 2



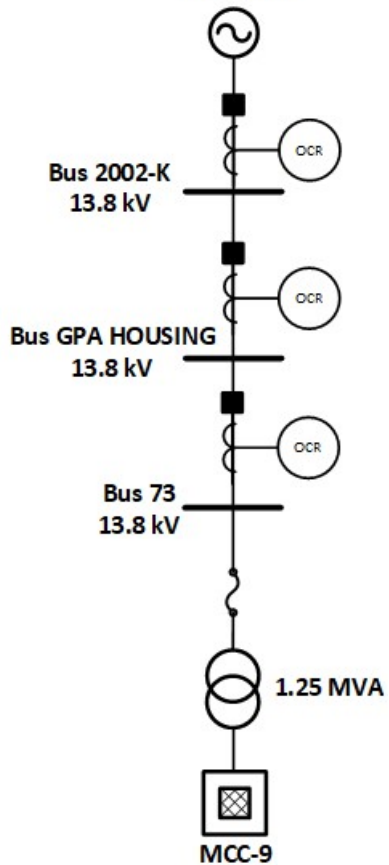
Gambar 4.2 Tipikal 2 PT. Pupuk Kujang

Tipikal 3



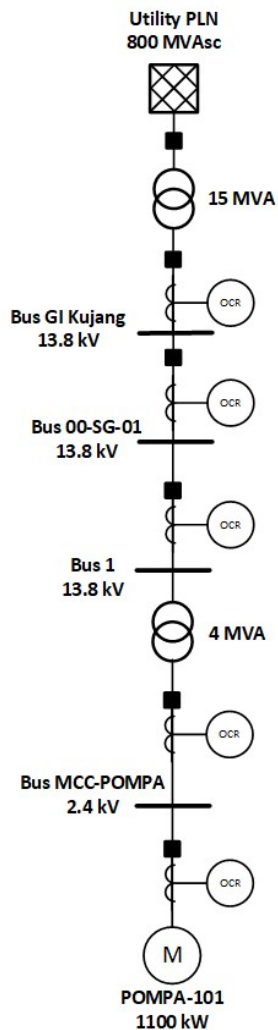
Gambar 4.3 Tipikal 3 PT.
Pupuk Kujang

Tipikal 4
2006J (GTG HITACHI)
18.35 MW



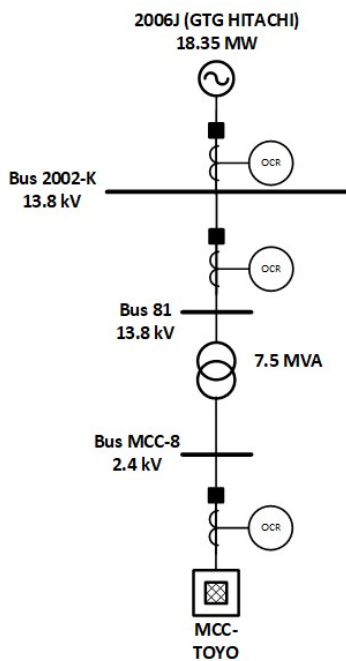
Gambar 4.4 Tipikal 4 PT. Pupuk
Kujang

Tipikal 5



Gambar 4.5 Tipikal 5 PT. Pupuk Kujang

Tipikal 6



Gambar 4 6 Tipikal 6 PT. Pupuk Kujang

4.3 Analisis Busur Api

Seperti yang sudah dijelaskan pada bab sebelumnya, pada tugas akhir ini akan menganalisis busur api pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Kujang dengan metode perhitungan busur api menggunakan kurva batasan energi dan kemudian dibandingkan dengan metode perhitungan busur api menggunakan standart IEEE 1584-2002. Adapun mengenai bus-bus yang akan dianalisis adalah sebagai berikut:

Tabel 4.1 Bus yang Akan Dilakukan Analisis Busur Api

No.	Bus ID	Level Tegangan
1	GI Kujang	13.8 kV
2	00-SG-01	13.8 kV
3	63-LBS-1A	13.8 kV
4	Bus3	13.8 kV
5	2002-K	13.8 kV
6	Bus56	13.8 kV
7	Bus81	13.8 kV
8	Bus64	13.8 kV
9	GPA HOUSING	13.8 kV
10	Bus102	13.8 kV
11	62-MCC-2	2.4 kV
12	MCC-POMPA	2.4 kV
13	MCC-3	2.4 kV
14	MCC-8	2.4 kV

4.4 Perhitungan Busur Api dengan *Setting* Waktu Rele Pengaman Eksisting PT. Pupuk Kujang

4.4.1. Perhitungan Busur Api

Pada perhitungan busur api menggunakan standar IEEE 1584-2002, yang harus diketahui adalah data mengenai arus gangguan *bolted* dan FCT (*fault clearing time*) pada tiap bus yang dianalisis. Arus gangguan *bolted* merupakan arus hubung singkat maksimum atau arus hubung

singkat tiga fasa pada $\frac{1}{2}$ cycle saat pembangkitan maksimum serta terdapat arus kontribusi dari beban. FCT merupakan waktu yang diperlukan rele untuk merasakan hgangguan serta sampai *circuit breaker* bekerja.

Dari *setting* waktu rele pengamanan eksisting, masih ada beberapa waktu *trip* rele yang belum koordinatif dan *fault clearing time* (FCT) yang besar. Rekapitulasi hasil nilai FCT dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data arus gangguan bolted (Isc bolted) dan FCT

No.	Bus IDE	Tegangan (kV)	Isc bolted (kA)	FCT (det)
1	GI Kujang	13,8	13,590	0,767
2	00-SG-01	13,8	13,600	0,760
3	63-LBS-1A	13,8	12,650	0,180
4	Bus3	13,8	12,58	0,140
5	2002-K	13,8	15,150	1,663
6	Bus56	13,8	13,810	0,116
7	Bus81	13,8	14,210	0,116
8	Bus64	13,8	15,040	0,116
9	GPA HOUSING	13,8	7,546	0,858
10	Bus73	13,8	6,742	0,116
11	62-MCC-2	2,4	22,820	0,116
12	MCC-POMPA	2,4	16,620	0,400
13	MCC-3	2,4	12,230	1,163
14	MCC-8	2,4	30,730	1,502

Dari tabel 4.2, maka akan dapat dicari arus *arcng*, energi insiden, dan jarak kerja dengan menggunakan metode standar IEEE 1548-2002. Hasil simulasi tersebut dapat dilihat dari tabel 4.3 di bawah ini:

Tabel 4.3 Data hasil simulasi menggunakan standar IEEE 1584-2002 rele eksisting

No.	Bus ID	Arus <i>Arcing</i> (kA)	Energi Insiden (cal/cm ²)	Kategori Bahaya
1	GI Kujang	13,13	17,182	3
2	00-SG-01	13,13	17,024	3
3	63-LBS-1A	12,23	3,739	1
4	Bus3	12,16	2,89	1
5	2002-K	14,6	41,762	>4
6	Bus56	13,38	2,652	1
7	Bus81	13,71	2,722	1
8	Bus64	14,45	2,892	1
9	GPA HOUSING	7,359	10,275	2
10	Bus73	6,587	1,232	1
11	62-MCC-2	21,84	7,768	2
12	MCC-POMPA	15,99	14,740	3
13	MCC-3	11,83	40,125	>4
14	MCC-8	29,26	70,299	>4

Rincian perhitungan busur api menggunakan standar IEEE 1584-2002 dapat dilihat sebagai berikut:

- BUS GI Kujang

Perhitungan arus *arcing* (I_A):

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(13,59)$$

$$\log(I_A) = 1,118$$

$$I_A = 13,121 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1 + K2 + 1,081 \log(I_A) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555 + 0,081 \times 1,118 + 0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 6,635 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 6,635 \times \left(\frac{0,767}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 6,635 \times 3,835 \times 0,678$$

$$E = 72,138 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 72,138 / 4,184$$

$$E = 17,241 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 6,635 \times \left(\frac{0,767}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 6,635 \times 3,835 \times 102,602}$$

$$D_B = 14138,54 \text{ mm} = 46,374 \text{ ft}$$

- BUS 00-SG-01

Perhitungan arus *arcing* (Ia):

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(13,6)$$

$$\log(I_A) = 1,1183$$

$$I_A = 13,131 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia)+0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0+1,081 \times 1,1183 + 0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 6,640 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 6,640 \times \left(\frac{0,76}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 6,640 \times 3,8 \times 0,678$$

$$E = 71,536 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 71,536 / 4,184$$

$$E = 17,097 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times 1 \times 6,640 \times \left(\frac{0,76}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0.973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times 1 \times 6,640 \times 3,8 \times 102,602}$$

$$D_B = 14017,197 \text{ mm} = 45,976 \text{ ft}$$

- BUS 63-LBS-1A

Perhitungan arus *arcing* (Ia):

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(12,65)$$

$$\log(I_A) = 1,0874$$

$$I_A = 12,229 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(I_A) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0,081 \times 1,0874 + 0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 6,148 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 6,148 \times \left(\frac{0,18}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0.973}}{910^{0.973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 6,148 \times 0,9 \times 0,678$$

$$E = 15,688 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 15,688 / 4,184$$

$$E = 3,75 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times 1 \times 6,148 \times \left(\frac{0,18}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0.973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times 1 \times 6,148 \times 0,9 \times 102,602}$$

$$D_B = 2947,248 \text{ mm} = 9,667 \text{ ft}$$

- BUS3

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(12,58)$$

$$\log(I_A) = 1,085$$

$$I_A = 12,162 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(I_a) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0+1,081 \times 1,085+0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 6,112 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 6,112 \times \left(\frac{0,14}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 6,112 \times 0,7 \times 0,678$$

$$E = 12,13 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 12,13 / 4,184$$

$$E = 2,899 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times 1 \times 6,112 \times \left(\frac{0,14}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0.973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times 1 \times 6,112 \times 0,7 \times 102,602}$$

$$D_B = 2262,621 \text{ mm} = 7,421 \text{ ft}$$

- BUS 2002-K

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(15,15)$$

$$\log(I_A) = 1,1644$$

$$I_A = 14,6 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(I_a) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0+1,081 \times 1,1644 + 0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 7,447 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 7,447 \times \left(\frac{1,663}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 7,447 \times 8,315 \times 0,678$$

$$E = 175,554 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 175,554 / 4,184$$

$$E = 41,959 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[x]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 7,447 \times \left(\frac{1,663}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 7,447 \times 8,315 \times 102,602}$$

$$D_B = 35266,96 \text{ mm} = 115,676 \text{ ft}$$

- BUS56

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(13,81)$$

$$\log(I_A) = 1,1267$$

$$I_A = 13,387 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(I_A) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0+1,081 \times 1,1267 + 0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 6,780 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 6,780 \times \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 6,780 \times 0,58 \times 0,678$$

$$E = 11,149 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 11,149 / 4,184$$

$$E = 2,665 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 6,780 \times \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 6,780 \times 0,58 \times 102,602}$$

$$D_B = 2078,8 \text{ mm} = 6,805 \text{ ft}$$

- BUS81

Perhitungan arus *arcing* (I_A):

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(14,21)$$

$$\log(I_A) = 1,137$$

$$I_A = 13,709 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(I_A) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0+1,081 \times 1,137+0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 6,957 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 6,957 \times \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 6,957 \times 0,58 \times 0,678$$

$$E = 11,44 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 11,44 / 4,184$$

$$E = 2,734 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 6,957 \times \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 6,957 \times 0,58 \times 102,602}$$

$$D_B = 2130,408 \text{ mm} = 6,988 \text{ ft}$$

- BUS64

Perhitungan arus *arcing* (Ia):

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(15,04)$$

$$\log(I_A) = 1,1613$$

$$I_A = 14,496 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0,081 \times 1,1613+0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 7,39 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 7,39 \times \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 7,39 \times 0,58 \times 0,678$$

$$E = 12,151 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 12,151 / 4,184$$

$$E = 2,904 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 7,39 \times \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 7,39 \times 0,58 \times 102,602}$$

$$D_B = 2266,665 \text{ mm} = 7,435 \text{ ft}$$

- BUS GPA HOUSING**

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(7,546)$$

$$\log(I_a) = 0,8668$$

$$I_a = 7,359 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(I_a)+0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0+1,081 \times 0,8668+0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 3,551 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 3,551 \times \left(\frac{0,858}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 3,551 \times 4,29 \times 0,678$$

$$E = 43,187 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 43,187 / 4,184$$

$$E = 10,322 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times 1 \times 3,551 \times \left(\frac{0,858}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0.973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times 1 \times 3,551 \times 4,29 \times 102,602}$$

$$D_B = 8344,699 \text{ mm} = 27,371 \text{ ft}$$

- BUS73

Perhitungan arus *arcing* (Ia):

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(6,742)$$

$$\log(I_A) = 0,8187$$

$$I_A = 6,587 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0,081 \times 0,8187 + 0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 3,15 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 3,15 \times \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0.973}}{910^{0.973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 3,15 \times 0,58 \times 0,678$$

$$E = 5,18 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 5,18 / 4,184$$

$$E = 1,238 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times 1 \times 3,15 \times \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0.973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times 1 \times 3,15 \times 0,58 \times 102,602}$$

$$D_B = 943,695 \text{ mm} = 3,095 \text{ ft}$$

- BUS 62-MCC-2

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(22,82)$$

$$\log(I_A) = 1,3392$$

$$I_A = 21,84 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(I_a) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0+1,081 \times 1,3392 + 0,0011 \times 102}$$

$$E_n = 10,114 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 10,114 \times \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0.973}}{455^{0.973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 10,114 \times 0,58 \times 1,330$$

$$E = 32,646 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 32,646 / 4,184$$

$$E = 7,802 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times 1 \times 10,114 \times \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0.973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times 1 \times 10,114 \times 0,58 \times 102,602}$$

$$D_B = 3129,511 \text{ mm} = 10,265 \text{ ft}$$

- BUS MCC-POMPA

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(16,62)$$

$$\log(I_A) = 1,2039$$

$$I_A = 15,992 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(I_a) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0+1,081 \times 1,2039 + 0,0011 \times 102}$$

$$E_n = 7,221 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 7,221 \times \left(\frac{0,4}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{455^{0,973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 7,221 \times 2 \times 1,330$$

$$E = 80,375 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 80,375 / 4,184$$

$$E = 19,210 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 7,221 \times \left(\frac{0,4}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 7,221 \times 2 \times 102,602}$$

$$D_B = 7900,050 \text{ mm} = 25,912 \text{ ft}$$

- BUS MCC-3

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(12,23)$$

$$\log(I_A) = 1,073$$

$$I_A = 11,829 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0+1,081 \times 1,073 + 0,0011 \times 102}$$

$$E_n = 5,213 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 5,213 \times \left(\frac{1,163}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{455^{0,973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 5,213 \times 5,815 \times 1,330$$

$$E = 168,691 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 168,691 / 4,184$$

$$E = 40,318 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 5,213 \times \left(\frac{1,163}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 5,213 \times 5,815 \times 102,602}$$

$$D_B = 16925,357 \text{ mm} = 55,515 \text{ ft}$$

- BUS MCC-8

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(30,73)$$

$$\log(I_A) = 1,4663$$

$$I_A = 29,261 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0+1,081 \times 1,4663 + 0,0011 \times 102}$$

$$E_n = 13,876 \text{ J/cm}^2$$

$$\begin{aligned}
E &= 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \\
E &= 4,184 \times 1 \times 13,876 \times \left(\frac{1,502}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right) \\
E &= 4,184 \times 1 \times 13,876 \times 7,51 \times 0,678 \\
E &= 295,443 \text{ J/cm}^2 \\
E &= 295,443 / 4,184 \\
E &= 70,613 \text{ cal/cm}^2
\end{aligned}$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$\begin{aligned}
D_B &= \sqrt[x]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)} \\
D_B &= \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 13,876 \times \left(\frac{1,502}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)} \\
D_B &= \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 13,876 \times 7,51 \times 102,602} \\
D_B &= 60214,813 \text{ mm} = 197,505 \text{ ft}
\end{aligned}$$

4.4.2. Perhitungan Busur Api dengan Menggunakan Metode Kurva Batas Energi

Dalam penggunaan metode kurva batas energi, perlu dilakukan penggambaran kurva kategori pada tiap PPE yang ada. Kurva batas energi menunjukkan hubungan antara arus terhadap waktu yang dihitung untuk setiap kategori PPE. Pada tiap bus yang dianalisis terdapat dua tegangan yang diambil. Yaitu bus dengan tegangan 2,4 kV dan tegangan 13,8 kV.

4.4.2.1. Penentuan Kurva Batasan Energi

Dari standar IEEE 1584-2002, persamaan hubungan arus terhadap waktu untuk level tegangan 1-15 kV akan didapatkan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
A_1 &= 4,184 \times E_n \times \left(\frac{C_f}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \\
A_2 &= K_1 + K_2 + 0,0011 \times G \\
A'_2 &= 10^{A_2}
\end{aligned}$$

$$t = \frac{E}{A_1 \times A'_2 \times I_a^{1,081}}$$

Dimana dari parameter yang ada, pada bus tegangan 2,4 kV dan 13,8 kV diketahui:

$$C_f = 1$$

$$D = 910 \text{ mm (switchgear)} \\ 455 \text{ mm (MCC)}$$

$$x = 0,973$$

$$K_1 = -0,555 \text{ (konfigurasi dengan enclosure)}$$

$$K_2 = 0 \text{ (ungrounded)}$$

$$G = 153 \text{ (untuk switchgear pada tegangan 13,8 kV)} \\ 102 \text{ (untuk switchgear dan MCC pada tegangan 2,4 kV)}$$

Sehingga, untuk switchgear pada tegangan 13,8 kV yang ungrounded

$$A_1 = 4,184 \times \left(\frac{C_f}{0,2} \right) \times \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \\ = 4,184 \times \left(\frac{1}{0,2} \right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right) \\ = 14,1756$$

$$A_2 = K_1 + K_2 + 0,0011 \times G \\ = -0,555 + 0 + 0,0011 \times 153 \\ = -0,3867$$

$$A'_2 = 10^{A_2} \\ = 10^{-0,3867} \\ = 0,4105$$

Untuk switchgear dan MCC pada tegangan 2,4 kV yang ungrounded, nilai A_2 dan A'_2 adalah

$$A_2 = K_1 + K_2 + 0,0011 \times G \\ = -0,555 + 0 + 0,0011 \times 102 \\ = -0,4428$$

$$A'_2 = 10^{A_2} \\ = 10^{-0,4428} \\ = 0,3607$$

Sedangkan untuk nilai A_1 MCC 2,4 kV adalah

$$\begin{aligned} A_1 &= 4,184 \times \left(\frac{C_f}{0,2} \right) \times \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \\ &= 4,184 \times \left(\frac{1}{0,2} \right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{455^{0,973}} \right) \\ &= 27,8255 \end{aligned}$$

Berdasarkan NFPA 70E tahun 2015, kategori 0 tidak dimasukkan lagi kedalam kategori bahaya. Sehingga, pada kategori 0 kurva batas energi, nilai energi insiden (E) pada kategori 0 adalah $5,02 \text{ J/cm}^2$ ($1,2 \text{ cal/cm}^2$). Dimana, seseorang dianggap akan terkena luka bakar tingkat 2 pada energi insiden sebesar $1,2 \text{ cal/cm}^2$. Maka untuk *swirchgear* pada tegangan 13,8 kV *ungrounded* kategori 0 $E = 5,02 \text{ J/cm}^2$ yaitu,

$$\begin{aligned} t &= \frac{E}{A_1 \times A'_2 \times I_a^{1,081}} \\ &= \frac{5,02}{14,1756 \times 0,4105 \times I_a^{1,081}} \\ t &= 0,8628 \times I_a^{-1,081} \end{aligned}$$

Untuk PPE kategori 1, $E = 16,74 \text{ J/cm}^2$ yaitu,

$$\begin{aligned} t &= \frac{E}{A_1 \times A'_2 \times I_a^{1,081}} \\ &= \frac{16,74}{14,1756 \times 0,4105 \times I_a^{1,081}} \\ t &= 2,8762 \times I_a^{-1,081} \end{aligned}$$

Untuk PPE kategori 2, $E = 33,47 \text{ J/cm}^2$ yaitu,

$$\begin{aligned} t &= \frac{E}{A_1 \times A'_2 \times I_a^{1,081}} \\ &= \frac{33,47}{14,1756 \times 0,4105 \times I_a^{1,081}} \\ t &= 5,7523 \times I_a^{-1,081} \end{aligned}$$

Untuk PPE kategori 3, $E = 104,6 \text{ J/cm}^2$ yaitu,

$$t = \frac{E}{A_1 \times A'_2 \times I_a^{1,081}}$$

$$t = \frac{104,6}{14,1756 \times 0,4105 \times I_a^{1,081}}$$

$$t = 17,9759 \times I_a^{-1,081}$$

Untuk PPE kategori 4, E = 167,36 J/cm² yaitu,

$$t = \frac{E}{A_1 \times A'_2 \times I_a^{1,081}}$$

$$t = \frac{167,36}{14,1756 \times 0,4105 \times I_a^{1,081}}$$

$$t = 28,7614 \times I_a^{-1,081}$$

Sedangkan untuk *swirchgear* dan MCC pada tegangan 2,4 kV *ungrounded*, hasilnya sebagai berikut

Switchgear

PPE kategori 0 E = 5,02 J/cm² yaitu,

$$t = \frac{E}{A_1 \times A'_2 \times I_a^{1,081}}$$

$$= \frac{5,02}{14,1756 \times 0,3607 \times I_a^{1,081}}$$

$$= 0,9818 \times I_a^{-1,081}$$

PPE kategori 1, E = 16,74 J/cm² yaitu,

$$t = \frac{E}{A_1 \times A'_2 \times I_a^{1,081}}$$

$$t = \frac{16,74}{14,1756 \times 0,3607 \times I_a^{1,081}}$$

$$t = 3,2727 \times I_a^{-1,081}$$

PPE kategori 2, E = 33,47 J/cm² yaitu,

MCC

PPE kategori 0 E = 5,02 J/cm² yaitu,

$$t = \frac{E}{A_1 \times A'_2 \times I_a^{1,081}}$$

$$t = \frac{5,02}{27,8255 \times 0,3607 \times I_a^{1,081}}$$

$$t = 0,5002 \times I_a^{-1,081}$$

PPE kategori 1, E = 16,74 J/cm² yaitu,

$$t = \frac{E}{A_1 \times A'_2 \times I_a^{1,081}}$$

$$t = \frac{16,74}{27,8255 \times 0,3607 \times I_a^{1,081}}$$

$$t = 1,6673 \times I_a^{-1,081}$$

PPE kategori 2, E = 33,47 J/cm² yaitu,

$$t = \frac{E}{A_1 \times A'_2 \times I_a^{1,081}} \\ = \frac{33,47}{14,1756 \times 0,3607 \times I_a^{1,081}} \\ = 6,5455 \times I_a^{-1,081}$$

PPE kategori 3, E = 104,6 J/cm² yaitu,

$$t = \frac{E}{A_1 \times A'_2 \times I_a^{1,081}} \\ = \frac{104,6}{14,1756 \times 0,3607 \times I_a^{1,081}} \\ t = 20,4546 \times I_a^{-1,081}$$

PPE kategori 4, E = 167,36 J/cm² yaitu,

$$t = \frac{E}{A_1 \times A'_2 \times I_a^{1,081}} \\ = \frac{167,36}{14,1756 \times 0,3607 \times I_a^{1,081}} \\ t = 32,7274 \times I_a^{-1,081}$$

$$t = \frac{E}{A_1 \times A'_2 \times I_a^{1,081}} \\ = \frac{33,47}{27,8255 \times 0,3607 \times I_a^{1,081}} \\ t = 3,3346 \times I_a^{-1,081}$$

PPE kategori 3, E = 104,6 J/cm² yaitu,

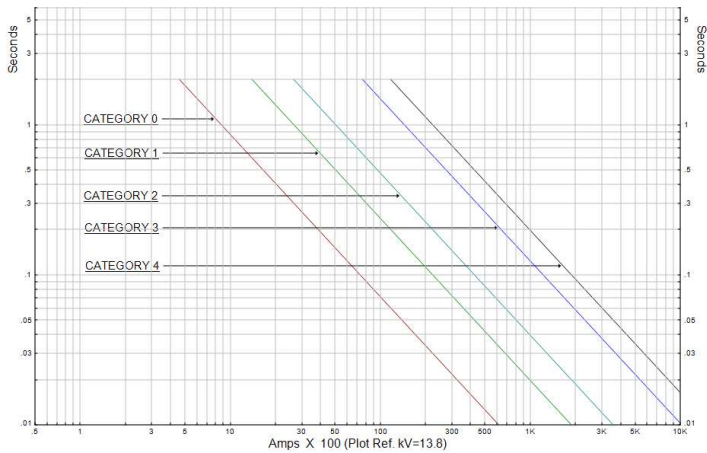
$$t = \frac{E}{A_1 \times A'_2 \times I_a^{1,081}} \\ = \frac{104,6}{27,8255 \times 0,3607 \times I_a^{1,081}} \\ t = 10,4205 \times I_a^{-1,081}$$

PPE kategori 4, E = 167,36 J/cm² yaitu,

$$t = \frac{E}{A_1 \times A'_2 \times I_a^{1,081}} \\ = \frac{167,36}{27,8255 \times 0,3607 \times I_a^{1,081}} \\ t = 16,6728 \times I_a^{-1,081}$$

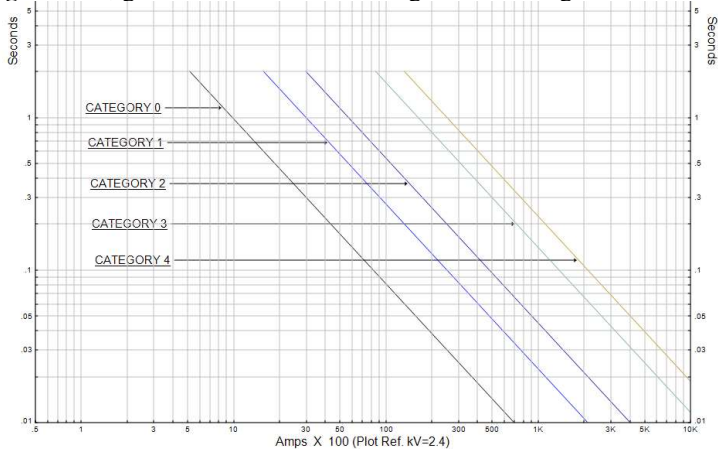
Persamaan di atas merupakan persamaan hubungan arus terhadap waktu untuk setiap kategori PPE dengan standar energi insiden berdasarkan NFPA 70E-2015. Dari setiap persamaan tersebut, diubah menjadi kurva garis yang merupakan kurva batasan energi. Kurva batas energi tersebut nantinya digambar dari waktu 0,01 detik hingga 2 detik. Dimana nilai waktu 2 detik berdasarkan IEEE 1584 dan NFPA 70 E 2015 dianggap merupakan waktu yang diperkirakan seseorang untuk bisa lari dari sumber busur api.

Adapun gambar kurva batasan energi untuk *swirchgear* pada tegangan 13,8 kV yang *ungrounded* adalah sebagai berikut:

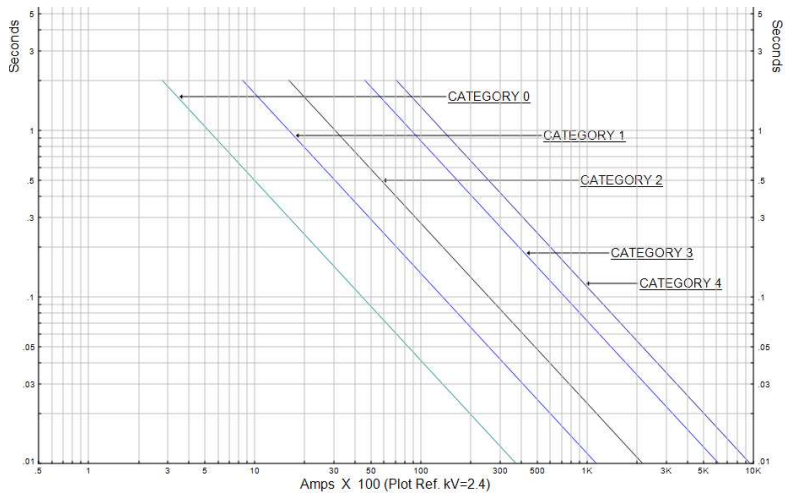


Gambar 4.7 Kurva batasan energi *swirchgear* tegangan 13,8 kV yang *ungrounded*

Untuk Maka untuk *swirchgear* pada tegangan 2,4 kV yang *ungrounded*, gambar kurva batasan energi adalah sebagai berikut:



Gambar 4.8 Kurva batasan energi *swirchgear* tegangan 2,4 kV yang *ungrounded*



Gambar 4.9 Kurva batasan energi MCC tegangan 2,4 kV yang *ungrounded*

Yang dilakukan selanjutnya adalah analisis dengan mensimulasikan kondisi 85% - 100% arus *arcing* dan durasi berlangsungnya sampai relay pengaman dan *circuit breaker* memutus gangguan (FCT).

4.4.2.2. Perhitungan Jarak Batas Busur Api

Untuk menghitung jarak batas busur api pada tiap kategori PPE yang ada, maka kita perlu menggunakan persamaan (2.18) yang telah dibahas pada bab 2. Nilai dari parameter yang diperlukan untuk menghitung jarak batas busur api pada sistem dengan tegangan antara 1 kV hingga 15 kV adalah sebagai berikut:

$$D_{WD} = 910 \text{ mm (switchgear)} \\ 455 \text{ mm (MCC)}$$

$$E_{WD} = \text{Nilai energi insiden pada tiap – tiap kategori PPE (J/cm}^2\text{)}$$

$$x = 0,973$$

$$E_B = \text{Nilai energi insiden pada level DB yang mengakibatkan luka bakar tingkat kedua, yaitu } 5.02 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas busur api *switchgear* PPE kategori 0 $E_{WD} = 5,02 \text{ J/cm}^2$ yaitu,

$$D_B = \frac{D_{WD}}{x \sqrt{\frac{E_B}{E_{WD}}}} = \frac{910}{0,973 \sqrt{\frac{5,02}{5,02}}} = 910 \text{ mm} = 0,91 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 1, $E_{WD} = 16,74 \text{ J/cm}^2$ yaitu,

$$D_B = \frac{D_{WD}}{x \sqrt{\frac{E_B}{E_{WD}}}} = \frac{910}{0,973 \sqrt{\frac{5,02}{16,74}}} = 3.136 \text{ mm} = 3,136 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 2, $E = 33,47 \text{ J/cm}^2$ yaitu,

$$D_B = \frac{D_{WD}}{x \sqrt{\frac{E_B}{E_{WD}}}} = \frac{910}{0,973 \sqrt{\frac{5,02}{33,47}}} = 6.395 \text{ mm} = 6,395 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 3, $E_{WD} = 104,6 \text{ J/cm}^2$ yaitu,

$$D_B = \frac{D_{WD}}{x \sqrt{\frac{E_B}{E_{WD}}}} = \frac{910}{0,973 \sqrt{\frac{5,02}{104,6}}} = 20.625 \text{ mm} = 20,625 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 4, $E_{WD} = 167,36 \text{ J/cm}^2$ yaitu,

$$D_B = \frac{D_{WD}}{x \sqrt{\frac{E_B}{E_{WD}}}} = \frac{910}{0,973 \sqrt{\frac{5,02}{167,36}}} = 33.433 \text{ mm} = 33,433 \text{ meter}$$

Perhitungan jarak batas busur api MCC PPE kategori 0 $E_{WD} = 5,02 \text{ J/cm}^2$ yaitu,

$$D_B = \frac{D_{WD}}{x \sqrt{\frac{E_B}{E_{WD}}}} = \frac{455}{0,973 \sqrt{\frac{5,02}{5,02}}} = 455 \text{ mm} = 0,455 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 1, $E_{WD} = 16,74 \text{ J/cm}^2$ yaitu,

$$D_B = \frac{D_{WD}}{x \sqrt{\frac{E_B}{E_{WD}}}} = \frac{455}{0,973 \sqrt{\frac{5,02}{16,74}}} = 1.568 \text{ mm} = 1,568 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 2, $E = 33,47 \text{ J/cm}^2$ yaitu,

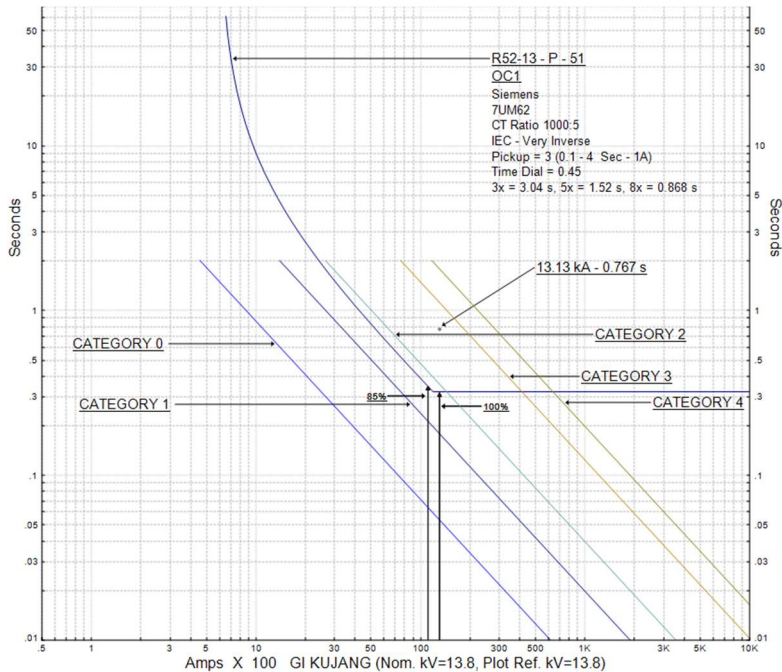
$$D_B = \frac{D_{WD}}{x \sqrt{\frac{E_B}{E_{WD}}}} = \frac{455}{0,973 \sqrt{\frac{5,02}{33,47}}} = 3.197 \text{ mm} = 3,197 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 3, $E_{WD} = 104,6 \text{ J/cm}^2$ yaitu,

$$D_B = \frac{D_{WD}}{x \sqrt{\frac{E_B}{E_{WD}}}} = \frac{455}{0,973 \sqrt{\frac{5,02}{104,6}}} = 10.625 \text{ mm} = 10,313 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 4, $E_{WD} = 167,36 \text{ J/cm}^2$ yaitu,

$$D_B = \frac{D_{WD}}{x \sqrt{\frac{E_B}{E_{WD}}}} = \frac{455}{0,973 \sqrt{\frac{5,02}{167,36}}} = 16.717 \text{ mm} = 16,717 \text{ meter}$$

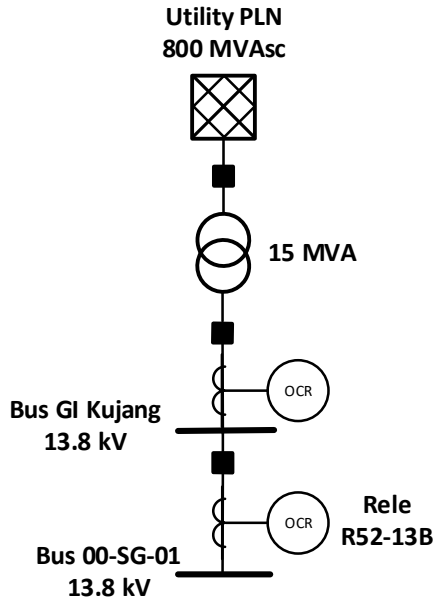


Gambar 4.11 Kurva batas energi pada kurva rele R52-13 sebagai pengaman bus GI Kujang

Pada bus GI Kujang, digunakan kurva batas energi pada *switchgear* 13.8 kV. Hasil *plotting* kurva rele R52-13 terlihat bahwa kurva rele berada di atas kurva batas energi kategori 1. Kemudian, sesuai dengan standar IEEE 1548-2002, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus *arc* yang dihubungkan dengan waktu FCT pengaman rele 52-13 pada waktu 0.768 detik. Kondisi maksimum busur api dicapai pada nilai arus *arc* 100% yaitu sebesar 13,13 kA yang berlangsung selama 0.767 detik. Gangguan tersebut berada di atas kurva batas kategori 2 dan menyebabkan PPE kategori 2 tidak cukup untuk digunakan pada daerah bus GI kujang. Maka PPE kategori 3 adalah pilihan yang tepat untuk digunakan pada bus GI Kujang. Jarak batas busur api maksimum pada kategori tersebut adalah 20,625 meter.

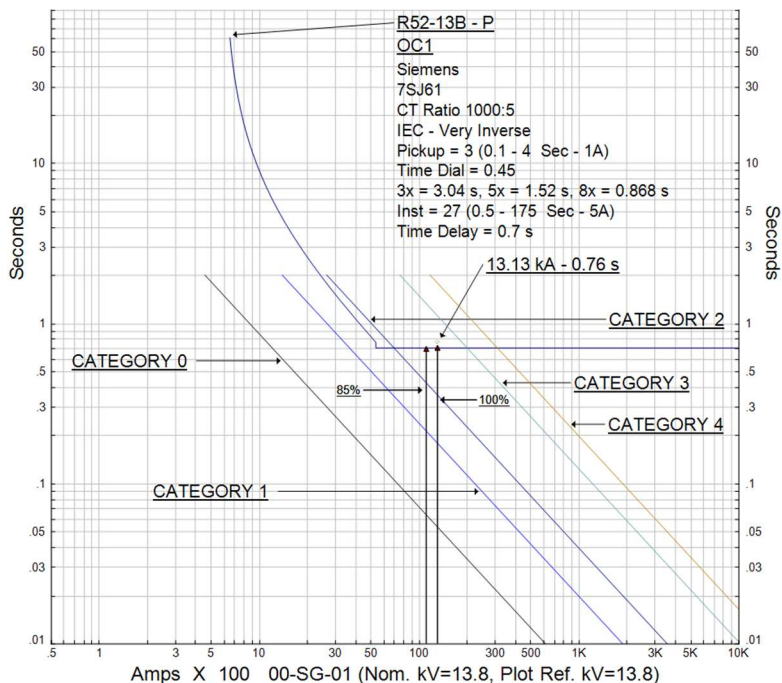
4.4.2.4. *Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi Bus 00-SG-01 pada Kondisi Eksisting*

Untuk menentukan kategori PPE pada bus 00-SG-01, maka rele referensi yang digunakan adalah rele R53-13B. Rele ini nantinya bertugas dalam memutus arus kontribusi jika terjadi gangguan pada bus tersebut pada waktu yang telah ditentukan.



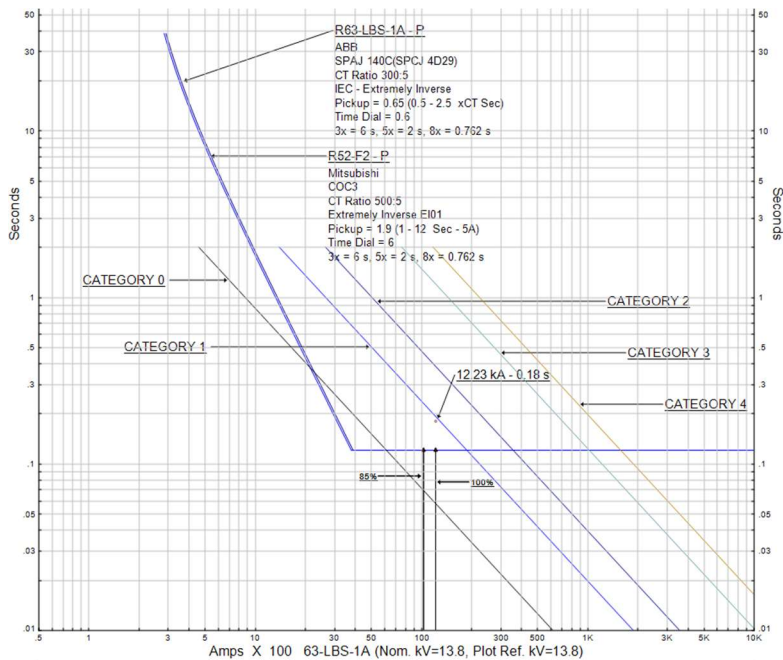
Gambar 4.12 Rele R52-13B sebagai pengaman bus 00-SG-01

Analisis penentuan kategori PPE yang digunakan pada bus dapat dilihat pada gambar 4.13:



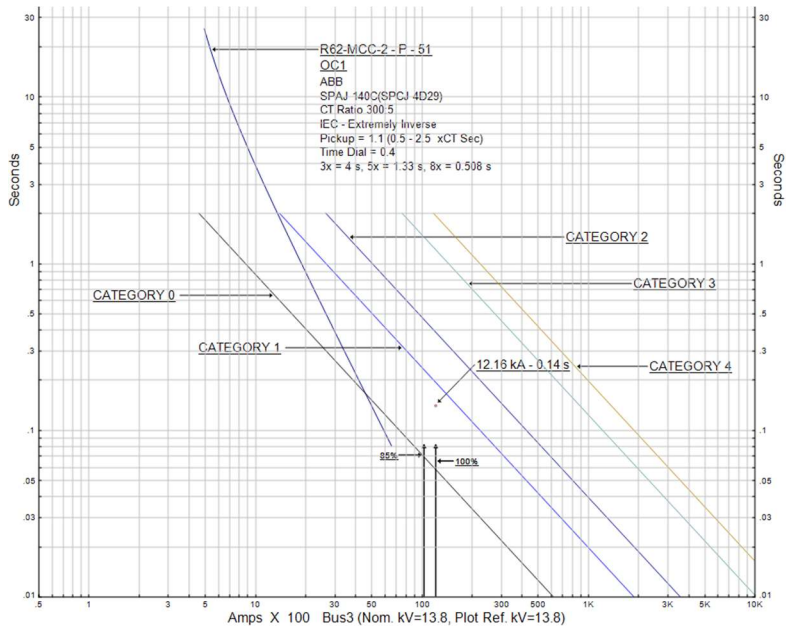
Gambar 4.13 Kurva batas energi pada kurva rele R52-13B sebagai pengaman bus 00-SG-01

Pada gambar 4.13 terlihat bahwa kurva rele berada di atas kurva batas energi kategori 1. Kemudian, sesuai dengan standar IEEE 1548-2002, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus *arcing* yang dihubungkan dengan pengaman rele 52-13B pada FCT 0,76 detik. Kondisi maksimum busur api dicapai pada nilai arus *arcing* 100% yaitu sebesar 13,13 kA yang berlangsung selama 0,76 detik. Gangguan tersebut berada di atas kurva batas kategori 2. Dari gambar tersebut dapat ditentukan nilai PPE yang harus digunakan pada bus, yaitu PPE kategori 3. Jarak batas busur api maksimum pada kategori tersebut adalah 20,625 meter.



Gambar 4.15 Kurva batas energi pada kurva rele R52-F2 dan R63-LBS-1A sebagai pengaman bus 63-LBS-1A

Pada gambar 4.15 terlihat bahwa kurva rele sebagian berada di atas kurva batas energi kategori 0 dan sebagian lain berada di atasnya. Kemudian, sesuai dengan standar IEEE 1548-2002, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus *arcing* yang dihubungkan dengan pengaman rele R52-F2 dan R63-LBS-1A pada FCT 0,18 detik. Kondisi maksimum busur api dicapai pada nilai arus *arcing* 100% yaitu sebesar 12,23 kA yang berlangsung selama 0.18 detik. Gangguan tersebut berada di bawah kurva batas kategori 1. Dari gambar tersebut dapat ditentukan nilai PPE yang harus digunakan pada bus, yaitu PPE kategori 1. Jarak batas busur api maksimum pada kategori tersebut adalah 3,136 meter.



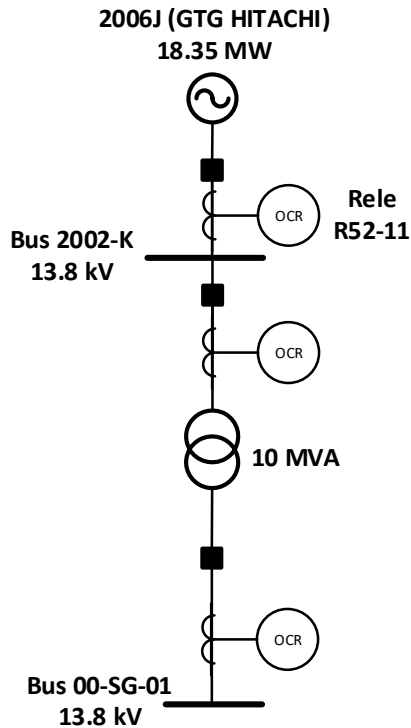
Gambar 4.17 Kurva batas energi pada kurva rele R62-MCC-2 sebagai pengaman Bus3

Pada gambar 4.17 terlihat bahwa kurva rele berada di bawah kurva batas energi kategori 1. Kemudian, sesuai dengan standar IEEE 1548-2002, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus *arcing* yang dihubungkan dengan pengaman rele R62-MCC-2 pada FCT 0,14 detik. Kondisi maksimum busur api dicapai pada nilai arus *arcing* 100% yaitu sebesar 12,16 kA yang berlangsung selama 0,14 detik. Gangguan tersebut berada di bawah kurva batas kategori 1. Dari gambar tersebut dapat ditentukan nilai PPE yang harus digunakan pada bus, yaitu PPE kategori 1. Jarak batas busur api maksimum pada kategori tersebut adalah 3,136 meter.

4.4.2.7. *Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi Bus 2002-K pada Kondisi Eksisting*

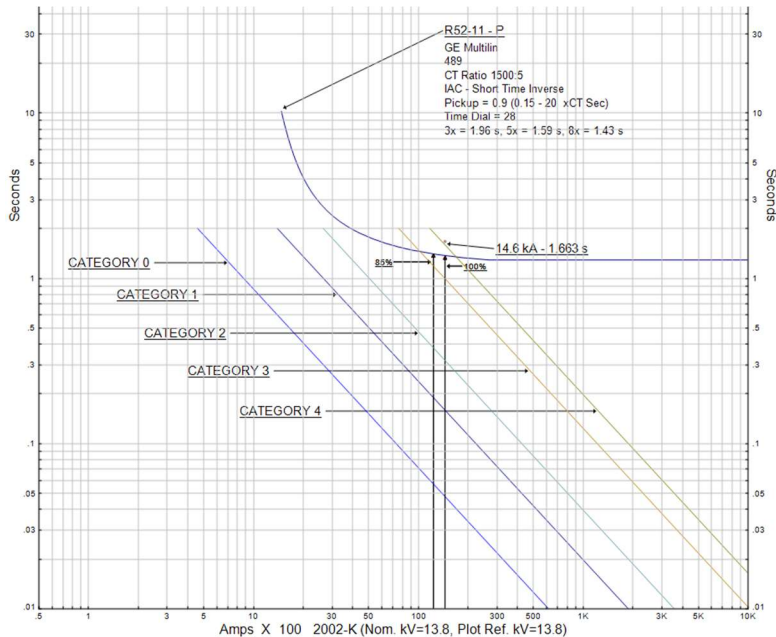
Untuk menentukan kategori PPE pada bus 2002-K, maka rele referensi yang digunakan adalah rele R52-11. Rele ini nantinya bertugas

dalam memutus arus kontribusi jika terjadi gangguan pada bus tersebut pada waktu yang telah ditentukan.



Gambar 4.18 Rele R52-11 sebagai pengaman bus 2002-K

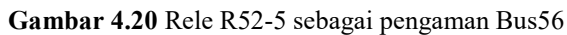
Analisis penentuan kategori PPE yang digunakan pada bus dapat dilihat pada gambar 4.19:



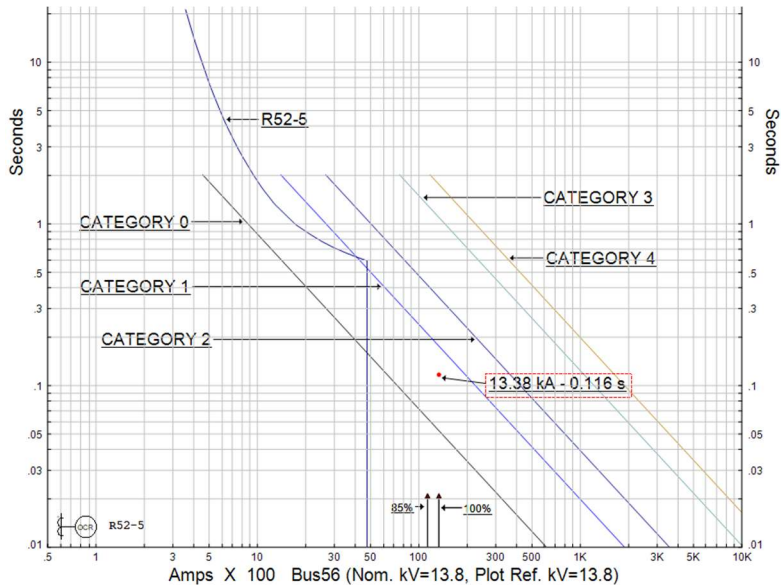
Gambar 4.19 Kurva batas energi pada kurva rele R52-11 sebagai pengaman bus 2002-K

Pada bus ini terlihat bahwa hasil dari *plotting* kurva rele berada di atas kurva batas energi kategori 2. Kemudian, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus *arcing* yang dihubungkan dengan pengaman rele R52-11 pada FCT 1,663 detik. Kondisi maksimum busur api dicapai pada nilai arus *arcing* 100% yaitu sebesar 14,6 kA yang berlangsung selama 1,663 detik. Gangguan tersebut berada di atas kurva batas kategori 4. Dari gambar tersebut dapat ditentukan nilai PPE yang harus digunakan pada bus, yaitu PPE kategori lebih besar dari 4. Jarak batas busur api pada kategori tersebut adalah harus lebih dari 33,433 meter.

Pada Bus56 ini, terdapat rele R52-5 yang berfungsi untuk mengamankan gangguan pada bus tersebut. Rele ini nantinya bertugas dalam memutus arus kontribusi jika terjadi gangguan pada bus tersebut pada waktu yang telah ditentukan.

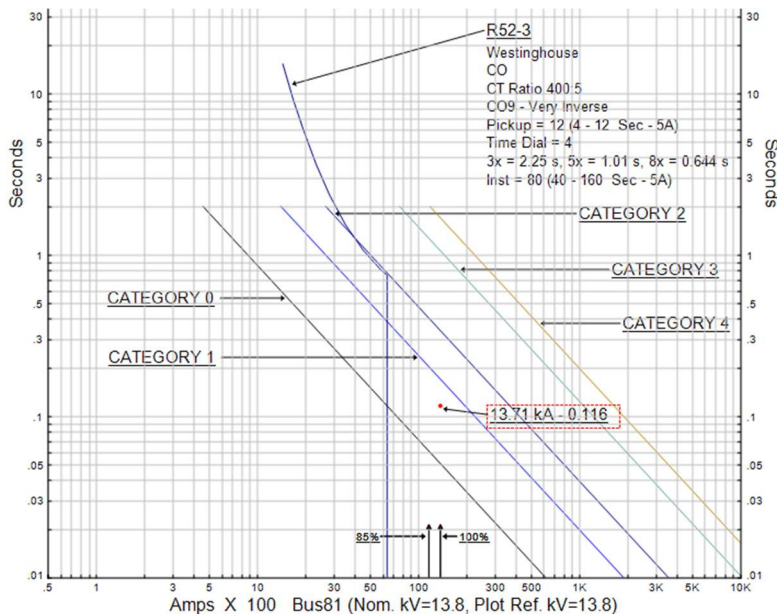


73



Gambar 4.21 Kurva batas energi pada kurva rele R52-5 sebagai pengaman Bus56

Pada bus ini terlihat bahwa hasil dari *plotting* kurva rele sebagian berada di atas kurva batas energi kategori 0 dan sebagian lainnya di bawah kategori 0. Kemudian, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus *arcing* yang dihubungkan dengan pengaman rele R52-5 pada FCT 0,116 detik. Kondisi maksimum busur api dicapai pada nilai arus *arcing* 100% yaitu sebesar 13,63 kA. Gangguan tersebut berada di bawah kurva batas kategori 1. Dari gambar tersebut dapat ditentukan nilai PPE yang harus digunakan pada bus, yaitu PPE kategori 1. Walaupun rele bekerja pada daerah instan yang berada di bawah kurva kategori 0, waktu gangguan dihilangkan merupakan waktu rele bekerja ditambah dengan waktu membukanya *circuit breaker*, sehingga yang dijadikan acuan adalah titik dimana arus gangguan *arcing* dihilangkan. Jarak batas busur api pada kategori tersebut adalah 3,136 meter.

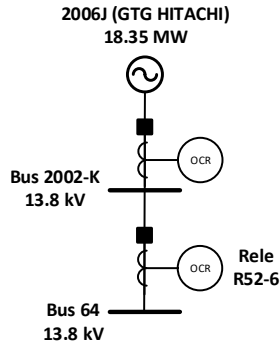


Gambar 4.23 Kurva batas energi pada kurva rele R52-3 sebagai pengaman Bus81

Pada bus ini terlihat bahwa hasil dari *plotting* kurva rele sebagian berada di atas kurva batas energi kategori 0 dan sebagian lainnya di bawah kategori 0. Kemudian, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus *arcing* yang dihubungkan dengan pengaman rele R52-3 pada FCT 0,116 detik. Kondisi maksimum busur api dicapai pada nilai arus *arcing* 100% yaitu sebesar 13,71 kA. Gangguan tersebut berada di bawah kurva batas kategori 1. Dari gambar tersebut dapat ditentukan nilai PPE yang harus digunakan pada bus, yaitu PPE kategori 1. Jarak batas busur api pada kategori tersebut adalah 3,136 meter.

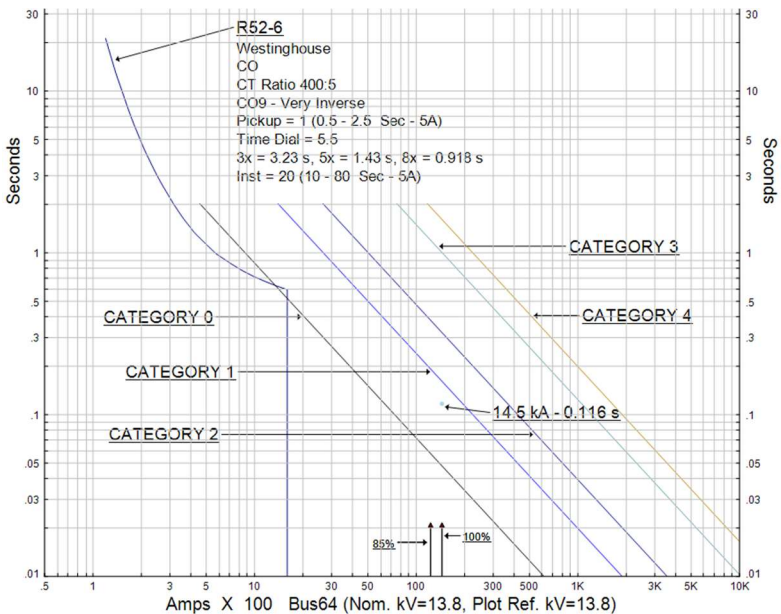
4.4.2.10. Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi Bus64 pada Kondisi Eksisting

Pada Bus64 ini, terdapat rele R52-6 yang berfungsi untuk mengamankan gangguan pada bus tersebut. Rele ini nantinya bertugas dalam memutus arus kontribusi jika terjadi gangguan pada bus tersebut pada waktu yang telah ditentukan.



Gambar 4.24 Rele R52-6 sebagai pengaman Bus64

Analisis penentuan kategori PPE yang digunakan pada bus dapat dilihat pada gambar 4.25:

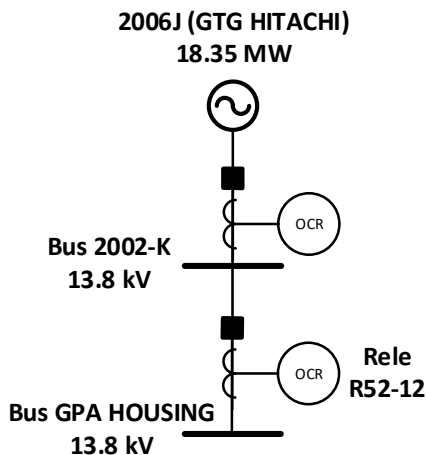


Gambar 4.25 Kurva batas energi pada kurva rele R52-6 sebagai pengaman Bus64

Pada bus ini terlihat bahwa hasil dari *plotting* kurva rele sebagian berada di atas kurva batas energi kategori 0 dan sebagian lainnya di bawah kategori 0. Kemudian, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus *arc*ing yang dihubungkan dengan pengamanan rele R52-6 pada FCT 0,116 detik. Kondisi maksimum busur api dicapai pada nilai arus *arc*ing 100% yaitu sebesar 14,6 kA. Gangguan tersebut berada di bawah kurva batas kategori 1. Dari gambar tersebut dapat ditentukan nilai PPE yang harus digunakan pada bus, yaitu PPE kategori 1. Jarak batas busur api pada kategori tersebut adalah 3,136 meter.

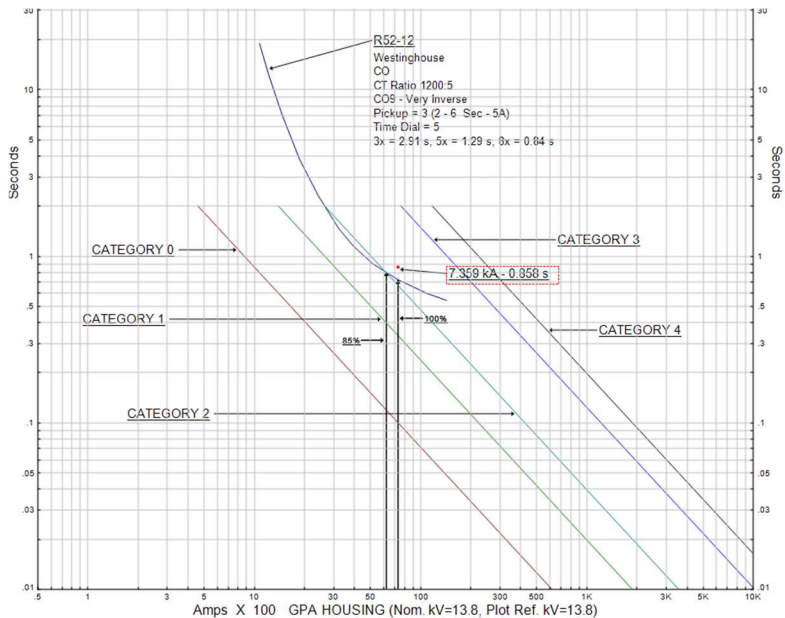
4.4.2.11. *Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi Bus GPA HOUSING pada Kondisi Eksisting*

Pada bus GPA HOUSING, terdapat rele R52-12 yang digunakan sebagai pengamanan utama apabila terjadi gangguan pada bus tersebut. Rele ini nantinya bertugas dalam memutus arus kontribusi jika terjadi gangguan pada bus tersebut pada waktu yang telah ditentukan.



Gambar 4.26 Rele R52-12 sebagai pengamanan bus GPA HOUSING

Analisis penentuan kategori PPE yang digunakan pada bus dapat dilihat pada gambar 4.27:



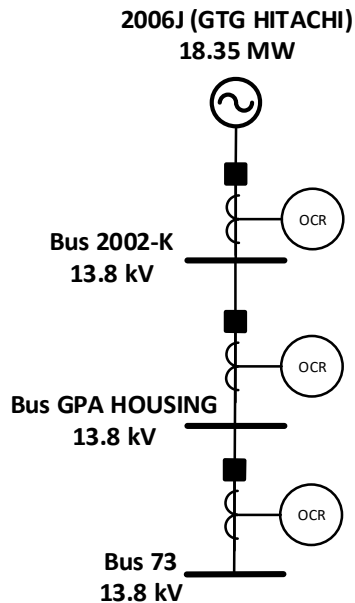
Gambar 4.27 Kurva batas energi pada kurva R52-12 sebagai pengaman bus GPA HOUSING

Pada gambar 4.27 terlihat bahwa kurva rele sebagian berada di bawah kurva batas energi kategori 2 dan sebagian lagi berada di atasnya. Kemudian, sesuai dengan standar IEEE 1548-2002, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus *arcing* yang dihubungkan dengan pengaman rele R52-F2 dan R63-LBS-1A pada FCT 0,858 detik. Kondisi maksimum busur api dicapai pada nilai arus *arcing* 100% yaitu sebesar 7,359 kA. Gangguan tersebut berada di atas kurva batas kategori 2. Dari gambar tersebut dapat ditentukan nilai PPE yang harus digunakan pada bus, yaitu PPE kategori 3. Jarak batas busur api maksimum pada kategori tersebut adalah 20,625 meter.

4.4.2.12. Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi Bus73 pada Kondisi Eksisting

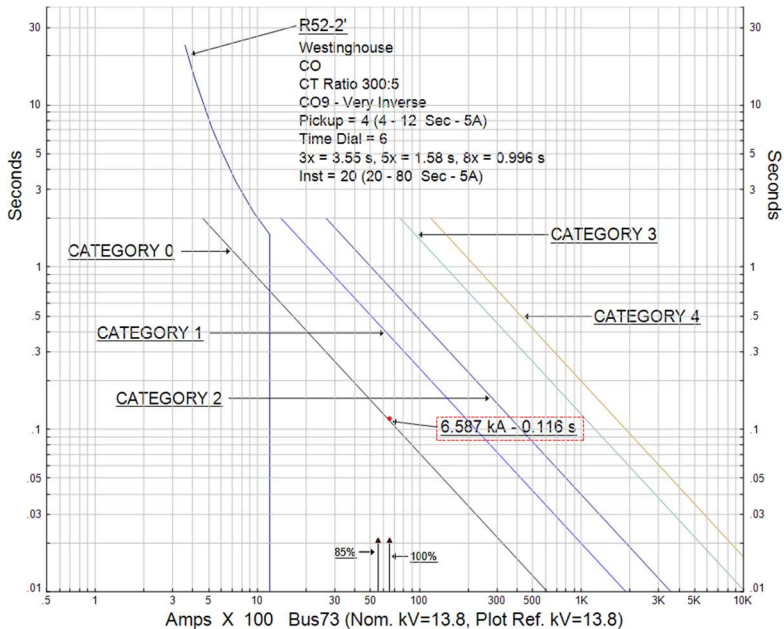
Pada Bus73 ini, terdapat rele R52-2' yang berfungsi untuk mengamankan gangguan pada bus tersebut. Rele ini nantinya bertugas

dalam memutus arus kontribusi jika terjadi gangguan pada bus tersebut pada waktu yang telah ditentukan.



Gambar 4.28 Rele R52-2' sebagai pengaman Bus73

Analisis penentuan kategori PPE yang digunakan pada bus dapat dilihat pada gambar 4.29:

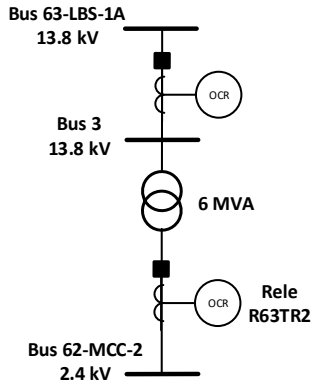


Gambar 4.29 Kurva batas energi pada kurva rele R52-2' sebagai pengaman Bus73

Pada bus ini terlihat bahwa hasil dari *plotting* kurva rele berada di bawah kategori 1. Kemudian, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus *arcing* yang dihubungkan dengan pengaman rele R52-6 pada FCT 0,116 detik. Kondisi maksimum busur api dicapai pada nilai arus *arcing* 100% yaitu sebesar 6,587 kA. Gangguan tersebut berada di bawah kurva batas kategori 1. Dari gambar tersebut dapat ditentukan nilai PPE yang harus digunakan pada bus, yaitu PPE kategori 1. Jarak batas busur api pada kategori tersebut adalah 3,136 meter.

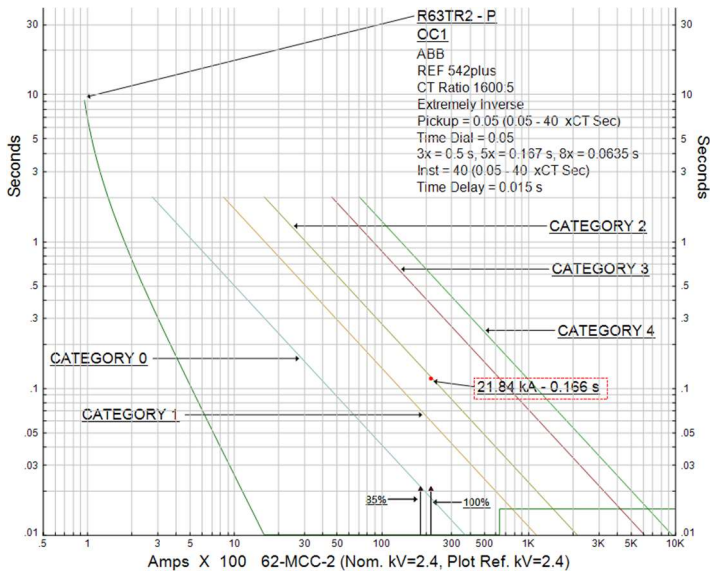
4.4.2.13. Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi Bus 62-MCC-2 pada Kondisi Eksisting

Pada bus 62-MCC-2 ini, terdapat rele R63TR2 yang berfungsi untuk mengamankan gangguan pada bus tersebut. Rele ini nantinya bertugas dalam memutus arus kontribusi jika terjadi gangguan pada bus tersebut pada waktu yang telah ditentukan.

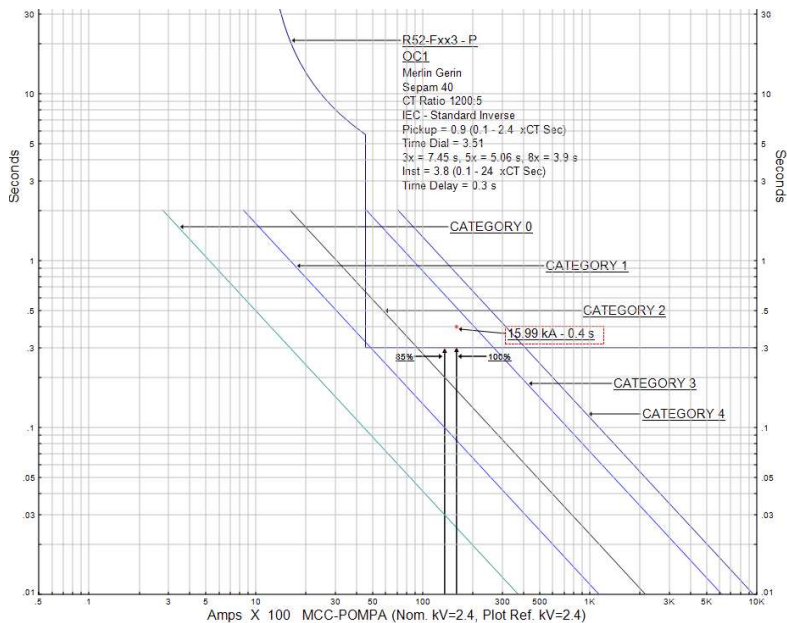


Gambar 4.30 Rele R63TR2 sebagai pengaman bus 62-MCC-2

Analisis penentuan kategori PPE yang digunakan pada bus dapat dilihat pada gambar 4.31:



Gambar 4.31 Kurva batas energi pada kurva rele R63TR2 sebagai pengaman bus 62-MCC-2

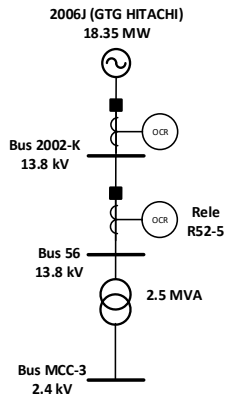


Gambar 4.33 Kurva batas energi pada kurva rele R52-Fxx3 sebagai pengaman bus MCC-POMPA

Pada bus ini, terlihat bahwa hasil dari *plotting* kurva rele sebagian berada di atas kurva batas energi kategori 1 dan sebagian lainnya di bawah kategori 1. Kemudian, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus *arc* yang dihubungkan dengan pengaman rele R52-6 pada FCT 0,4 detik. Kondisi maksimum busur api dicapai pada nilai arus *arc* 100% yaitu sebesar 15,99 kA. Gangguan tersebut berada di atas kurva batas kategori 2. Dari gambar tersebut dapat ditentukan nilai PPE yang harus digunakan pada bus, yaitu PPE kategori 3. Jarak batas busur api pada kategori tersebut adalah 10,313 meter.

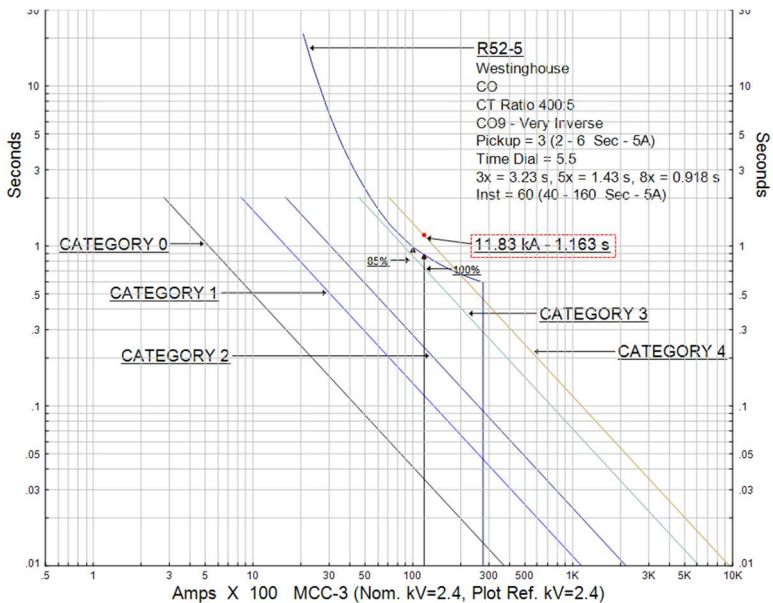
4.4.2.15. Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi Bus MCC-3 pada Kondisi Eksisting

Rele R52-5 yang berada pada bagian primer atau tegangan 13.8 kV juga berfungsi sebagai pengaman utama apabila terjadi gangguan pada bus MCC-3. Dimana kurva rele ini digunakan sebagai referensi pada kurva batasan energi.

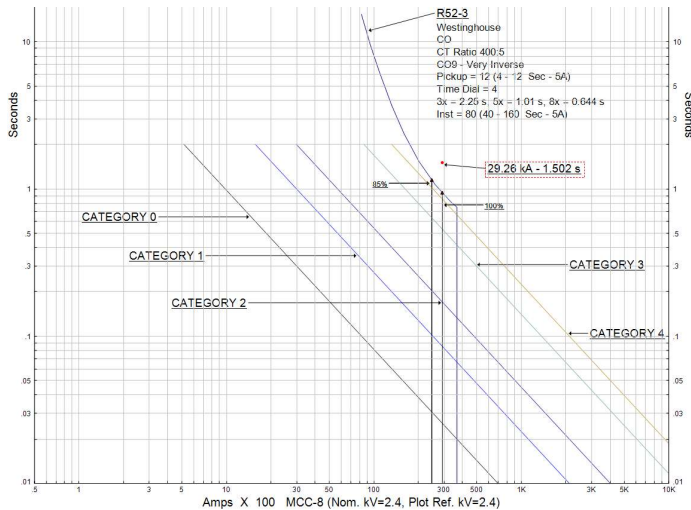


Gambar 4.34 Relé R52-5 sebagai pengaman Bus56 dan bus MCC-3

Analisis penentuan kategori PPE yang digunakan pada bus dapat dilihat pada gambar 4.35:



Gambar 4.35 Kurva batas energi pada kurva rele R52-5 sebagai pengaman bus MCC-3



Gambar 4.37 Kurva batas energi pada kurva rele R52-3 sebagai pengaman bus MCC-8

Pada bus ini, terlihat bahwa hasil dari *plotting* kurva rele sebagian berada di bawah kurva batas energi kategori 4 dan sebagian lainnya berada di atas kategori 4. Kemudian, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus *arc*ing yang dihubungkan dengan pengaman rele R52-6 pada FCT 1,502 detik. Kondisi maksimum busur api dicapai pada nilai arus *arc*ing 100% yaitu sebesar 29,26 kA. Gangguan tersebut berada di atas kurva batas kategori 4. Dari gambar tersebut dapat ditentukan nilai PPE yang harus digunakan pada bus, yaitu PPE kategori lebih besar dari 4. Jarak batas busur api pada kategori tersebut adalah harus lebih dari 33,433 meter.

4.5 Perhitungan Busur Api dengan *Setting* Waktu Rele Pengaman *Resetting* PT. Pupuk Kujang

Setelah dilakukan pemeriksaan busur apipada *seting* rele eksisting pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Kujang, maka perlu dilakukan penyetelan ulang atau *resetting* pada sistem proteksinya agar didapatkan koordinasi proteksi yang baik serta diharapkan dapat memperbaiki kategori bahaya

4.5.1. Perhitungan Busur Api dengan Menggunakan Standar IEEE 1594-2002

Dari *setting* waktu rele pengaman *resetting*, waktu *trip* rele yang sudah koordinatif. Nilai dari FCT setelah dilakukan *resetting* didapatkan kenaikan serta penurunan pada tiap bus yang dianalisis. Rekapitulasi hasil nilai FCT dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Data arus gangguan bolted (*Isc bolted*) dan FCT *resetting*

No.	Bus ID	Tegangan (kV)	<i>Isc bolted</i> (kA)	FCT (det)
1	GI Kujang	13,8	13,590	0,760
2	00-SG-01	13,8	13,600	0,760
3	63-LBS-1A	13,8	12,650	0,360
4	Bus3	13,8	12,58	0,160
5	2002-K	13,8	15,150	0,800
6	Bus56	13,8	13,810	0,382
7	Bus81	13,8	14,210	0,116
8	Bus64	13,8	15,040	0,395
9	GPA HOUSING	13,8	7,546	0,587
10	Bus73	13,8	6,742	0,395
11	62-MCC-2	2,4	22,820	0,400
12	MCC-POMPA	2,4	16,620	0,400
13	MCC-3	2,4	12,230	0,391
14	MCC-8	2,4	30,730	0,414

Dari tabel 4.4, maka akan dapat dicari arus *arcing*, energi insiden, dan jarak kerja dengan menggunakan metode standar IEEE 1548-2002. Hasil Perhitungan tersebut dapat dilihat dari tabel 4.5 di bawah ini:

Tabel 4.5 Data hasil simulasi menggunakan standar IEEE 1584-2002 rele *resetting*

No.	Bus ID	Arus Arcing (kA)	Energi Insiden (cal/cm ²)	Kategori Bahaya
1	GI Kujang	13,13	17,014	3
2	00-SG-01	13,13	17,024	3
3	63-LBS-1A	12,23	7,466	2
4	Bus3	12,16	3,298	1
5	2002-K	14,6	20,184	3
6	Bus56	13,38	8,727	3
7	Bus81	13,71	2,722	1
8	Bus64	14,45	9,838	3
9	GPA HOUSING	7,359	7,028	2
10	Bus73	6,587	4,193	2
11	62-MCC-2	21,84	26,905	4
12	MCC-POMPA	15,99	19,210	3
13	MCC-3	11,83	13,487	3
14	MCC-8	29,26	19.385	3

Rincian perhitungan busur api menggunakan standar IEEE 1584-2002 dapat dilihat sebagai berikut

- BUS GI Kujang

Perhitungan arus *arcing* (I_A):

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(13,59)$$

$$\log(I_A) = 1,118$$

$$I_A = 13,121 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1 + K2 + 1,081 \log(I_A) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555 + 0 + 1,081 \times 1,118 + 0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 6,635 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 6,635 \times \left(\frac{0,76}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 6,635 \times 3,8 \times 0,678$$

$$E = 71,480 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 71,480 / 4,184$$

$$E = 17,084 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 6,635 \times \left(\frac{0,767}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 6,635 \times 3,8 \times 102,602}$$

$$D_B = 14005,942 \text{ mm} = 45,939 \text{ ft}$$

- BUS 00-SG-01

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(13,6)$$

$$\log(I_a) = 1,1183$$

$$I_a = 13,131 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(I_a)+0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0,081 \times 1,1183+0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 6,640 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 6,640 \times \left(\frac{0,76}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 6,640 \times 3,8 \times 0,678$$

$$E = 71,536 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 71,536 / 4,184$$

$$E = 17,097 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times 1 \times 6,640 \times \left(\frac{0,76}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0.973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times 1 \times 6,640 \times 3,8 \times 102,602}$$

$$D_B = 14017,197 \text{ mm} = 45,976 \text{ ft}$$

- BUS 63-LBS-1A

Perhitungan arus *arcing* (Ia):

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(12,65)$$

$$\log(I_A) = 1,0874$$

$$I_A = 12,229 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(I_A) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0,081 \times 1,0874 + 0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 6,148 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 6,148 \times \left(\frac{0,36}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0.973}}{910^{0.973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 6,148 \times 1,8 \times 0,678$$

$$E = 31,376 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 31,376 / 4,184$$

$$E = 7,499 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times 1 \times 6,148 \times \left(\frac{0,36}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0.973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times 1 \times 6,148 \times 1,8 \times 102,602}$$

$$D_B = 6008,970 \text{ mm} = 19,709 \text{ ft}$$

- BUS3

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(12,58)$$

$$\log(I_A) = 1,085$$

$$I_A = 12,162 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(I_a) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0,081 \times 1,085 + 0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 6,112 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 6,112 \times \left(\frac{0,16}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 6,112 \times 0,8 \times 0,678$$

$$E = 13,863 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 13,863 / 4,184$$

$$E = 3,313 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times 1 \times 6,112 \times \left(\frac{0,16}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0.973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times 1 \times 6,112 \times 0,8 \times 102,602}$$

$$D_B = 2595,451 \text{ mm} = 8,513 \text{ ft}$$

- BUS 2002-K

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(15,15)$$

$$\log(I_A) = 1,1644$$

$$I_A = 14,6 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(I_a) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0,081 \times 1,1644 + 0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 7,447 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 7,447 \times \left(\frac{0,8}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 7,447 \times 4 \times 0,678$$

$$E = 84,452 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 84,452 / 4,184$$

$$E = 20,184 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 7,447 \times \left(\frac{0,8}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 7,447 \times 3,695 \times 102,602}$$

$$D_B = 16624,439 \text{ mm} = 54,528 \text{ ft}$$

- BUS56

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(13,81)$$

$$\log(I_A) = 1,1248$$

$$I_A = 13,33 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0,081 \times 1,1248 + 0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 6,749 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 6,749 \times \left(\frac{0,382}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 6,749 \times 1,91 \times 0,678$$

$$E = 36,546 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 36,546 / 4,184$$

$$E = 8,735 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 6,749 \times \left(\frac{0,382}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 6,749 \times 1,91 \times 102,602}$$

$$D_B = 7028,92 = 23,055 \text{ ft}$$

- BUS81

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(14,21)$$

$$\log(I_a) = 1,137$$

$$I_a = 13,709 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0+1,081 \times 1,137+0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 6,957 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 6,957 \times \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 6,957 \times 0,58 \times 0,678$$

$$E = 11,44 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 11,44 / 4,184$$

$$E = 2,734 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 6,957 \times \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 6,957 \times 0,58 \times 102,602}$$

$$D_B = 2130,408 \text{ mm} = 6,988 \text{ ft}$$

- BUS64

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(15,04)$$

$$\log(I_A) = 1,1613$$

$$I_A = 14,496 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(I_a) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0+ ,081 \times 1,1613 + ,0011 \times 153}$$

$$E_n = 7,39 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 7,39 \times \left(\frac{0,395}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 7,39 \times 1,975 \times 0,678$$

$$E = 41,376 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 41,376 / 4,184$$

$$E = 9,889 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times 1 \times 7,39 \times \left(\frac{0,395}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0.973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0.973]{4,184 \times 1 \times 7,39 \times 1,975 \times 102,602}$$

$$D_B = 7985,330 \text{ mm} = 26,192 \text{ ft}$$

- BUS GPA HOUSING**

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(7,546)$$

$$\log(I_a) = 0,8668$$

$$I_a = 7,359 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(I_a)+0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0+1,081 \times 0,8668+0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 3,551 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 3,551 \times \left(\frac{0,587}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 3,551 \times 2,935 \times 0,678$$

$$E = 29,547 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 29,547 / 4,184$$

$$E = 7,062 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[x]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 3,551 \times \left(\frac{0,587}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 3,551 \times 2,935 \times 102,602}$$

$$D_B = 5649,201 \text{ mm} = 18,529 \text{ ft}$$

- BUS73

Perhitungan arus *arcing* (Ia):

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(6,742)$$

$$\log(I_A) = 0,8187$$

$$I_A = 6,587 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0+1,081 \times 0,8187 + 0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 3,15 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 3,15 \times \left(\frac{0,395}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 3,15 \times 1,975 \times 0,678$$

$$E = 17,639 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 17,639 / 4,184$$

$$E = 4,216 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[x]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 3,15 \times \left(\frac{0,395}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 3,15 \times 1,975 \times 102,602}$$

$$D_B = 3324,583 \text{ mm} = 10,905 \text{ ft}$$

- BUS 62-MCC-2

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(22,82)$$

$$\log(I_A) = 1,3392$$

$$I_A = 21,84 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(I_a)+0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0+1,081 \times 1,3392+0,0011 \times 102}$$

$$E_n = 10,114 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 10,114 \times \left(\frac{0,4}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{455^{0,973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 10,114 \times 2 \times 1,330$$

$$E = 112,571 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 112,571 / 4,184$$

$$E = 26,905 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 10,114 \times \left(\frac{0,4}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 10,114 \times 2 \times 102,602}$$

$$D_B = 11168,544 \text{ mm} = 36,633 \text{ ft}$$

- BUS MCC-POMPA

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(16,62)$$

$$\log(I_A) = 1,2039$$

$$I_A = 15,992 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0,081 \times 1,2039 + 0,0011 \times 102}$$

$$E_n = 7,221 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 7,221 \times \left(\frac{0,4}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{455^{0,973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 7,221 \times 2 \times 1,330$$

$$E = 80,375 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 80,375 / 4,184$$

$$E = 19,210 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 7,221 \times \left(\frac{0,4}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 7,221 \times 2 \times 102,602}$$

$$D_B = 7900,050 \text{ mm} = 25,912 \text{ ft}$$

- BUS MCC-3

Perhitungan arus *arcing* (Ia):

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(12,23)$$

$$\log(I_A) = 1,073$$

$$I_A = 11,829 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+0+1,081 \times 1,073+0,0011 \times 02}$$

$$E_n = 5,213 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 5,213 \times \left(\frac{0,391}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{455^{0,973}}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 5,213 \times 1,955 \times 01,330$$

$$E = 56,714 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 56,714 / 4,184$$

$$E = 13,555 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 5,213 \times \left(\frac{0,391}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 5,213 \times 1,955 \times 102,602}$$

$$D_B = 5520,753 \text{ mm} = 18,108 \text{ ft}$$

- BUS MCC-8

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_A) = 0,00402 + 0,983 \log(30,73)$$

$$\log(I_A) = 1,4663$$

$$I_A = 29,261 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Insiden (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(I_a)+0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555-0,113+1,081 \times 1,4663+0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 13,876 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 13,876 \times \left(\frac{0,414}{0,2} \right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)$$

$$E = 4,184 \times 1 \times 13,876 \times 2,07 \times 0,678$$

$$E = 81,434 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 81,434 / 4,184$$

$$E = 19,463 \text{ cal/cm}^2$$

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2} \right) \times \left(\frac{610^x}{E_B} \right)}$$

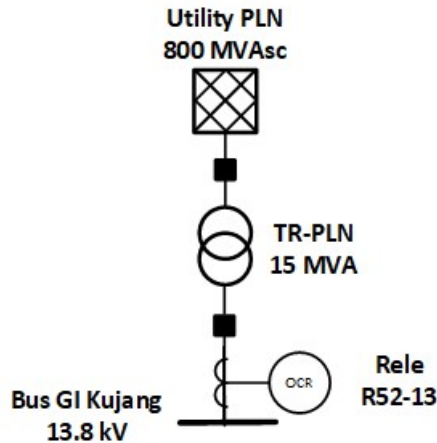
$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 13,876 \times \left(\frac{0,414}{0,2} \right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right)}$$

$$D_B = \sqrt[0,973]{4,184 \times 1 \times 13,876 \times 2,07 \times 102,602}$$

$$D_B = 16014,130 \text{ mm} = 52,526 \text{ ft}$$

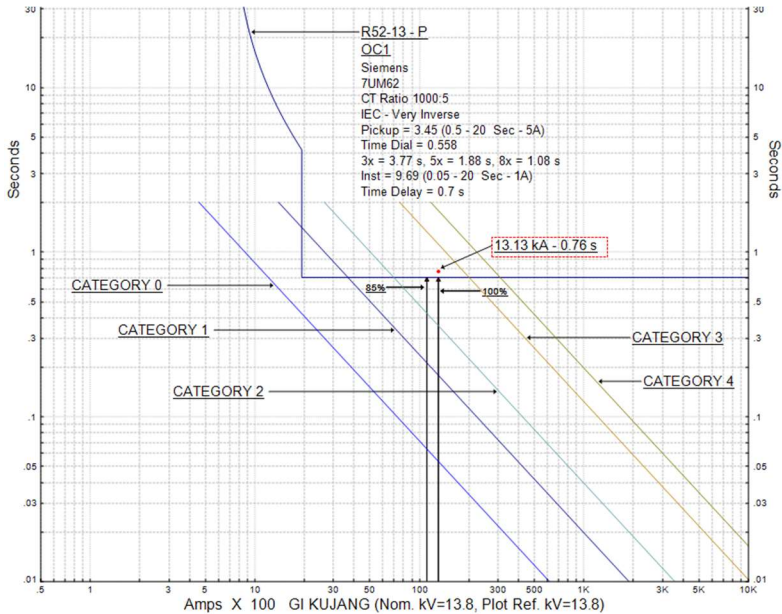
4.5.2. Perhitungan Busur Api dengan Menggunakan Metode Kurva Batas Energi

4.5.2.1. Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi Bus GI Kujang pada Kondisi Resetting



Gambar 4.38 Rele R52-13 sebagai pengaman bus GI Kujang

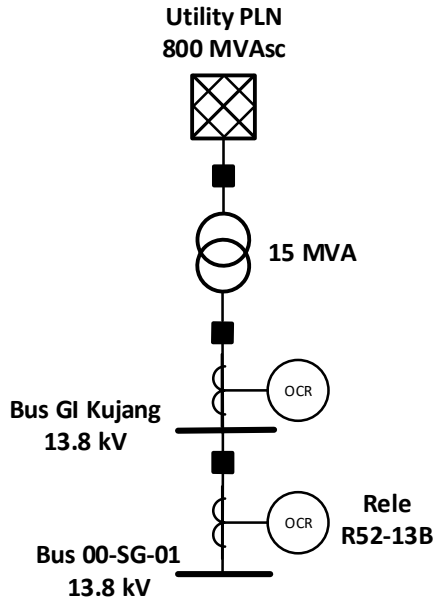
Analisis penentuan kategori PPE hasil *resetting* yang digunakan pada bus dapat dilihat pada gambar 4.39:



Gambar 4.39 Kurva batas energi pada kurva rele R52-13 hasil *resetting* sebagai pengaman bus GI Kujang

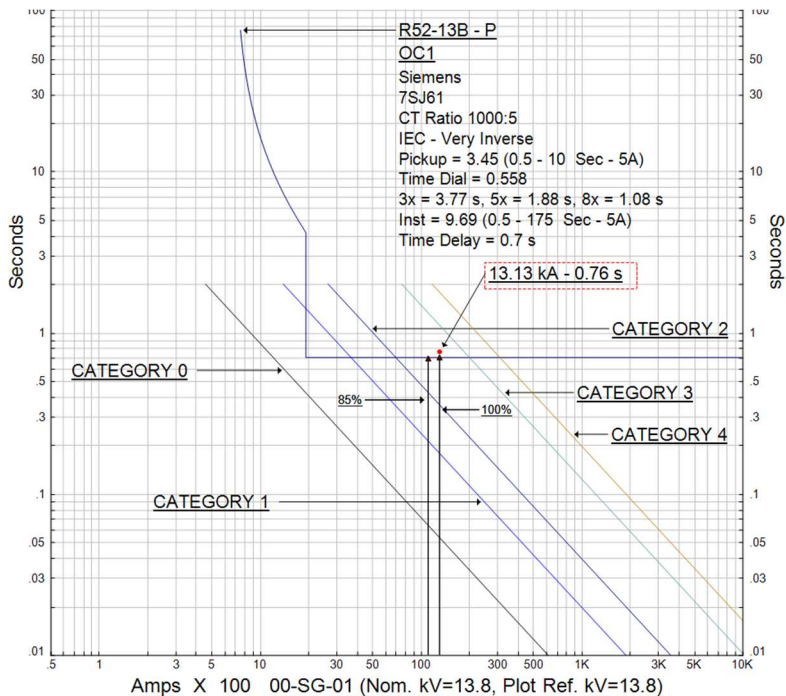
Pada bus GI Kujang, digunakan kurva batas energi pada *switchgear* 13.8 kV. Hasil *plotting* kurva rele R52-13 terlihat bahwa sebagian besar kurva rele berada di atas kurva batas energi kategori 1 dan sebagaian kecil berada di bawahnya. Kemudian, sesuai dengan standar IEEE 1548-2002, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus *arcing* yang dihubungkan dengan waktu FCT pengaman rele 52-13 pada waktu 0.76 detik. Kondisi maksimum busur api dicapai pada nilai arus *arcing* 100% yaitu sebesar 13,13 kA yang berlangsung selama 0.76 detik. Gangguan tersebut berada di atas kurva batas kategori 2 dan menyebabkan PPE kategori 2 tidak cukup untuk digunakan pada daerah bus GI kujang. Maka PPE kategori 3 adalah pilihan yang tepat untuk digunakan pada bus GI Kujang. Jarak batas busur api maksimum pada kategori tersebut adalah 20,625 meter.

4.5.2.2. Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi Bus 00-SG-01 pada Kondisi Resetting



Gambar 4.40 Rele R52-13B sebagai pengaman bus 00-SG-01

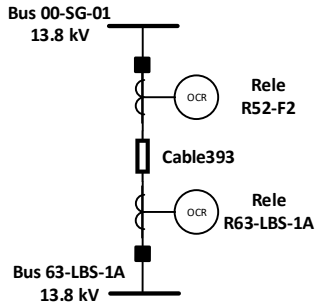
Analisis penentuan kategori PPE yang digunakan dari hasil *resetting* pada bus dapat dilihat pada gambar 4.41:



Gambar 4.41 Kurva batas energi pada kurva rele R52-13B hasil *resetting* sebagai pengaman bus 00-SG-01

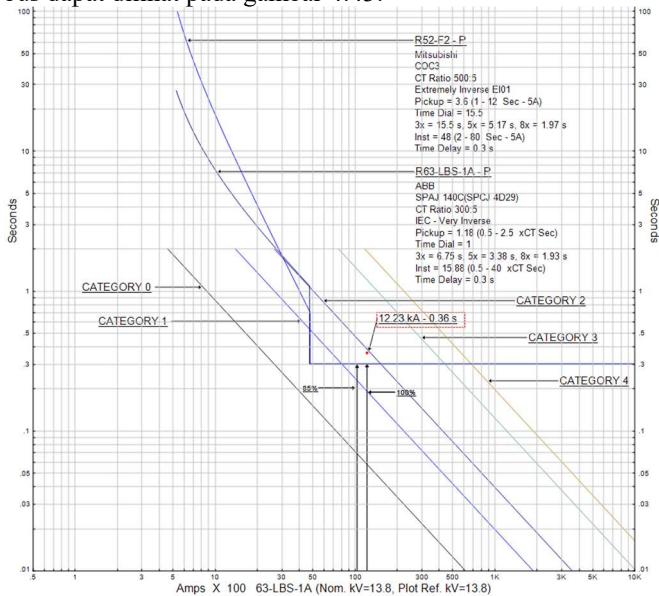
Pada gambar 4.41 terlihat bahwa sebagian besar kurva rele berada di atas kurva batas energi kategori 1 dan sebagian kecil berada di bawahnya. Kemudian, sesuai dengan standar IEEE 1548-2002, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus *arcing* yang dihubungkan dengan pengaman rele 52-13B pada FCT 0,76 detik. Kondisi maksimum busur api dicapai pada nilai arus *arcing* 100% yaitu sebesar 13,13 kA yang berlangsung selama 0.76 detik. Gangguan tersebut berada di atas kurva batas kategori 2. Dari gambar tersebut dapat ditentukan nilai PPE yang harus digunakan pada bus, yaitu PPE kategori 3. Jarak batas busur api maksimum pada kategori tersebut adalah 20,625 meter.

4.5.2.3. Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi Bus 63-LBS-1A pada Kondisi Resetting



Gambar 4.42 Rele R52-F2 dan R63-LBS-1A sebagai pengaman bus 63-LBS-1A

Analisis penentuan kategori PPE yang digunakan dari hasil *resetting* pada bus dapat dilihat pada gambar 4.43:

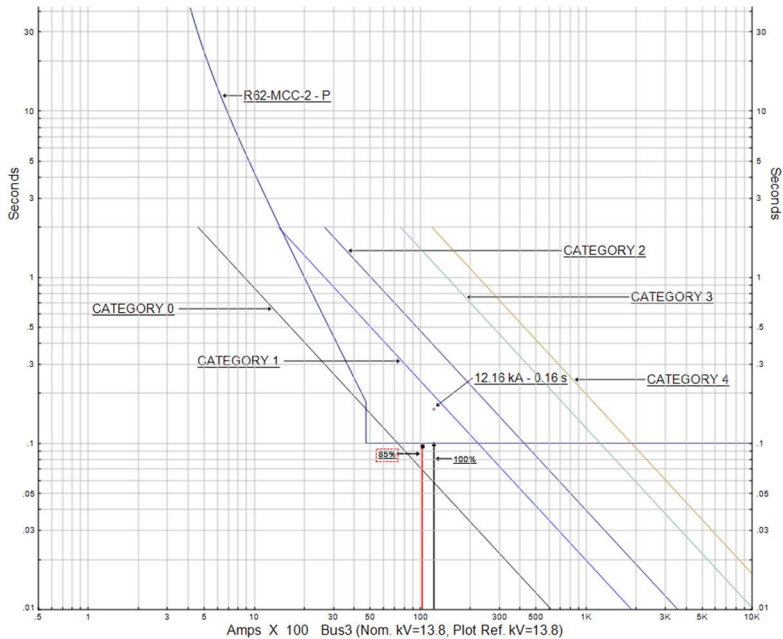


Gambar 4.43 Kurva batas energi pada kurva rele R52-F2 dan R63-LBS-1A hasil *resetting* sebagai pengaman bus 63-LBS-1A

4.5.2.4. Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi Bus3 pada Kondisi Resetting



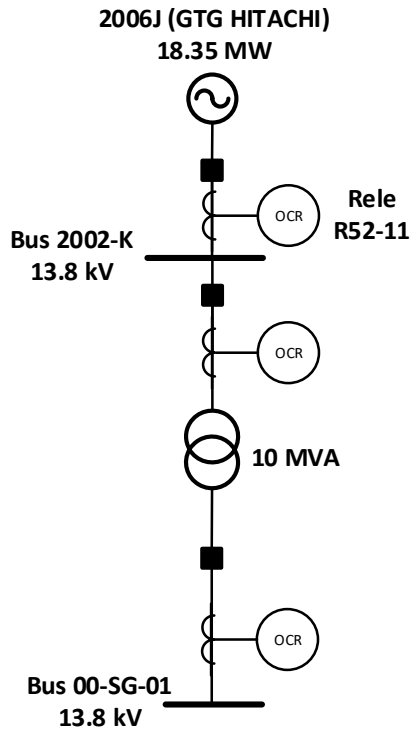
106



Gambar 4.45 Kurva batas energi pada kurva rele R62-MCC-2 hasil *resetting* sebagai pengaman Bus3

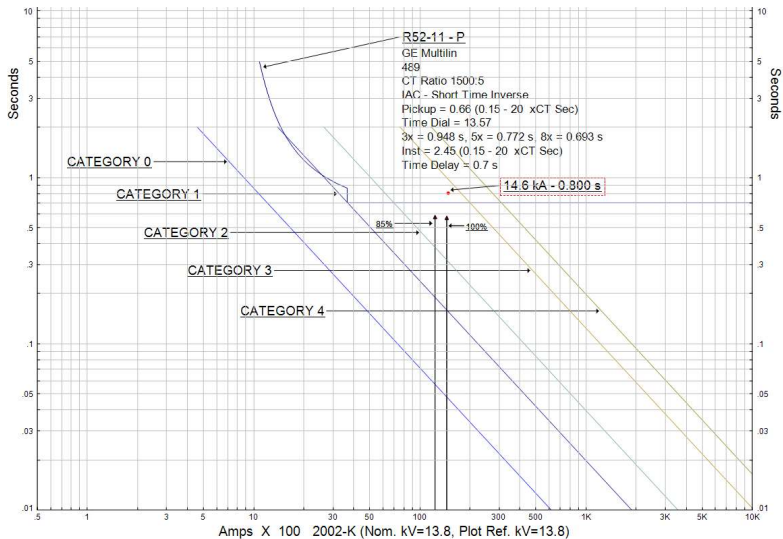
Pada gambar 4.45 terlihat bahwa kurva rele berada di atas kurva batas energi kategori 1 dan sebagian lagi berada di bawahnya. Kemudian, sesuai dengan standar IEEE 1548-2002, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus *arcing* yang dihubungkan dengan pengaman rele R62-MCC-2 pada FCT 0,16 detik. Kondisi maksimum busur api dicapai pada nilai arus *arcing* 100% yaitu sebesar 12,16 kA yang berlangsung selama 0.16 detik. Gangguan tersebut berada di bawah kurva batas kategori 1. Dari gambar tersebut dapat ditentukan nilai PPE yang harus digunakan pada bus, yaitu PPE kategori 1. Jarak batas busur api maksimum pada kategori tersebut adalah 3,136 meter.

4.5.2.5. Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi Bus 2002-K pada Kondisi Resetting



Gambar 4.46 Rele R52-11 sebagai pengaman bus 2002-K

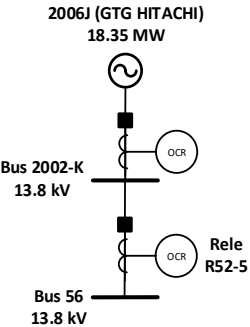
Analisis penentuan kategori PPE yang digunakan dari hasil *resetting* pada bus dapat dilihat pada gambar 4.46:



Gambar 4.47 Kurva batas energi pada kurva rele R52-11 hasil *resetting* sebagai pengaman bus 2002-K

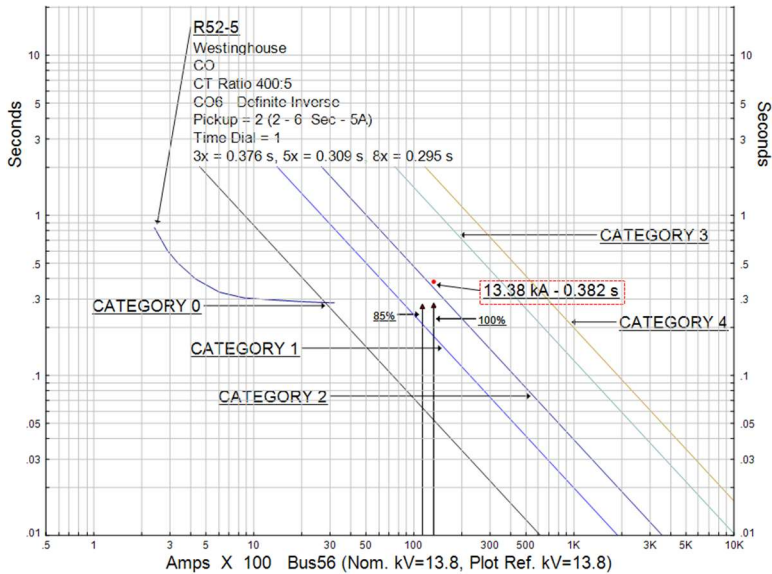
Pada bus ini terlihat bahwa hasil dari *plotting* kurva rele sebagian kecil berada di bawah kurva batas energi kategori 1 dan sebagian besar berada di atasnya. Kemudian, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus *arcing* yang dihubungkan dengan pengaman rele R52-11 pada FCT 0,739 detik. Kondisi maksimum busur api dicapai pada nilai arus *arcing* 100% yaitu sebesar 14,6 kA yang berlangsung selama 0,8 detik. Gangguan tersebut berada di bawah kurva batas kategori 3. Dari gambar tersebut dapat 3. Jarak batas busur api pada kategori tersebut adalah 20,625 meter.

4.5.2.6. *Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi Bus56 pada Kondisi Resetting*



Gambar 4.48 Rele R52-5 sebagai pengaman Bus56

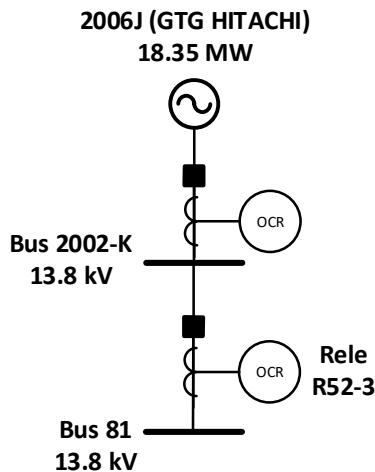
Analisis penentuan kategori PPE yang digunakan dari hasil *resetting* pada bus dapat dilihat pada gambar 4.4:9



Gambar 4.49 Kurva batas energi pada kurva rele R52-5 hasil *resetting* sebagai pengaman Bus56

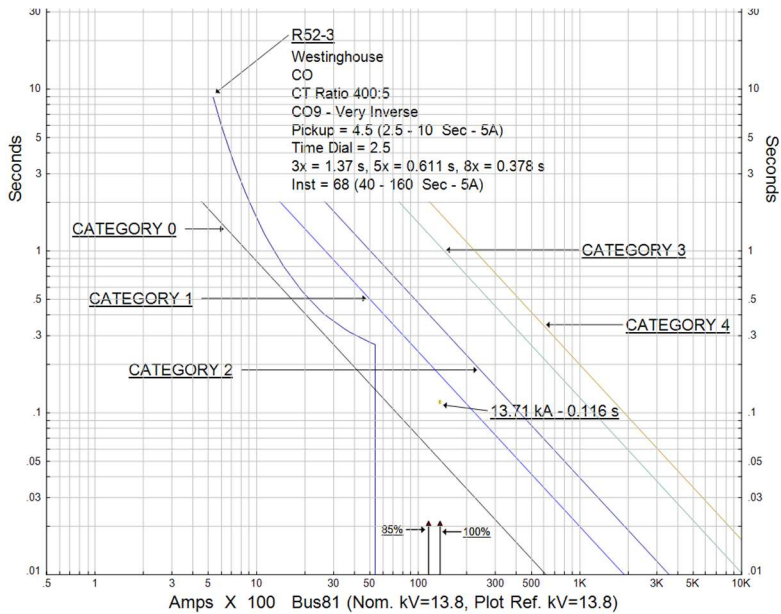
Pada bus ini terlihat bahwa hasil dari *plotting* kurva rele berada di bawah kurva batas energi kategori 1. Kemudian, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus *arcing* yang dihubungkan dengan pengaman rele R52-5 pada FCT 0,382 detik. Kondisi maksimum busur api dicapai pada nilai arus *arcing* 100% yaitu sebesar 13,38 kA. Gangguan tersebut berada di atas kurva batas kategori 2. Dari gambar tersebut dapat ditentukan nilai PPE yang harus digunakan pada bus, yaitu PPE kategori 3. Jarak batas busur api pada kategori tersebut adalah 20,625 meter.

4.5.2.7. Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi Bus81 pada Kondisi Resetting



Gambar 4.50 Rele R52-3 sebagai pengaman Bus81

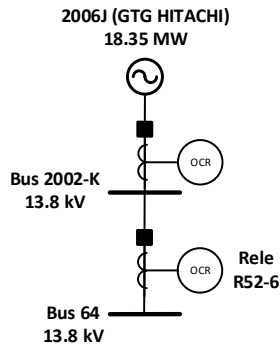
Analisis penentuan kategori PPE yang digunakan pada bus dari hasil *resetting* dapat dilihat pada gambar 4.51:



Gambar 4.51 Kurva batas energi pada kurva rele R52-3 hasil *resetting* sebagai pengaman Bus81

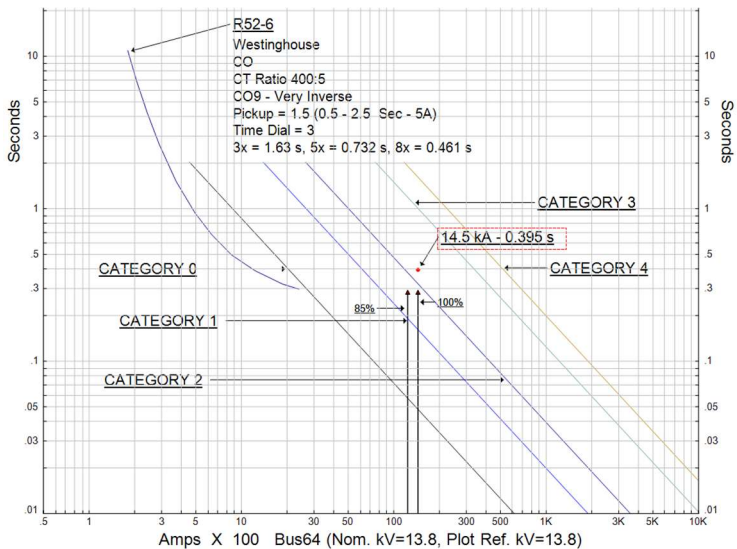
Pada bus ini terlihat bahwa hasil dari *plotting* kurva rele berada di bawah kurva batas energi kategori 1. Kemudian, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus *arc*ing yang dihubungkan dengan pengaman rele R52-3 pada FCT 0,116 detik. Kondisi maksimum busur api dicapai pada nilai arus *arc*ing 100% yaitu sebesar 13,71 kA. Gangguan tersebut berada di bawah kurva batas kategori 1. Dari gambar tersebut dapat ditentukan nilai PPE yang harus digunakan pada bus, yaitu PPE kategori 1. Jarak batas busur api pada kategori tersebut adalah 3,136 meter.

4.5.2.8. Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi Bus64 pada Kondisi Resetting



Gambar 4.52 Rele R52-6 sebagai pengaman Bus64

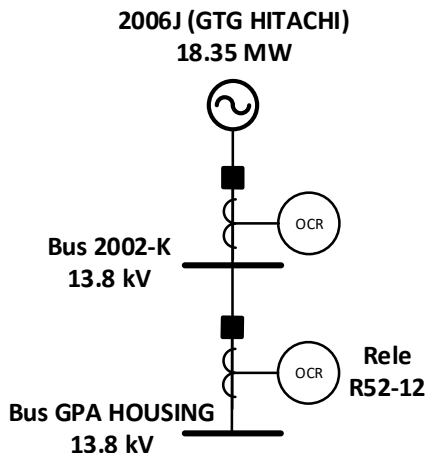
Analisis penentuan kategori PPE yang digunakan pada bus dari hasil *resetting* dapat dilihat pada gambar 4.53:



Gambar 4.53 Kurva batas energi pada kurva rele R52-6 hasil *resetting* sebagai pengaman Bus64

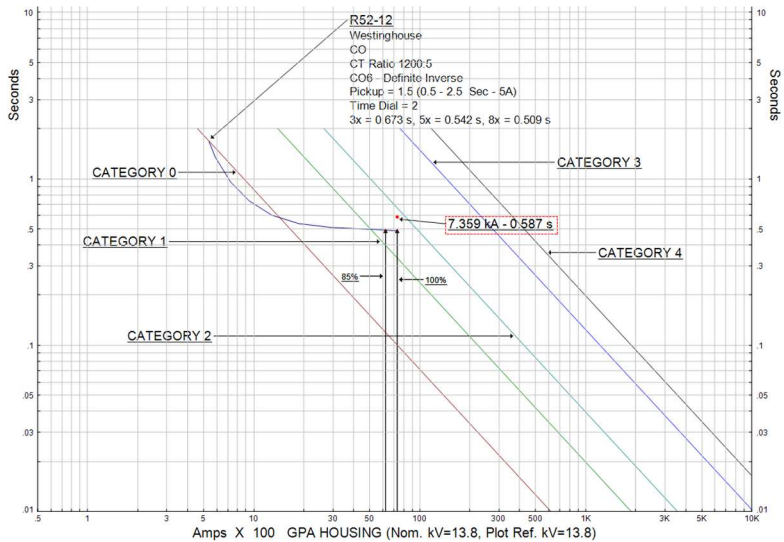
Pada bus ini terlihat bahwa hasil dari *plotting* kurva rele sebagian berada di bawah kurva batas energi kategori 0. Kemudian, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus *arcing* yang dihubungkan dengan pengaman rele R52-6 pada FCT 0,395 detik. Kondisi maksimum busur api dicapai pada nilai arus *arcing* 100% yaitu sebesar 14,5 kA. Gangguan tersebut berada di atas kurva batas kategori 2. Dari gambar tersebut dapat ditentukan nilai PPE yang harus digunakan pada bus, yaitu PPE kategori 3. Jarak batas busur api pada kategori tersebut adalah 20,625 meter.

4.5.2.9. *Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi Bus GPA HOUSING pada Kondisi Resetting*



Gambar 4.54 Rele R52-12 sebagai pengaman bus GPA HOUSING

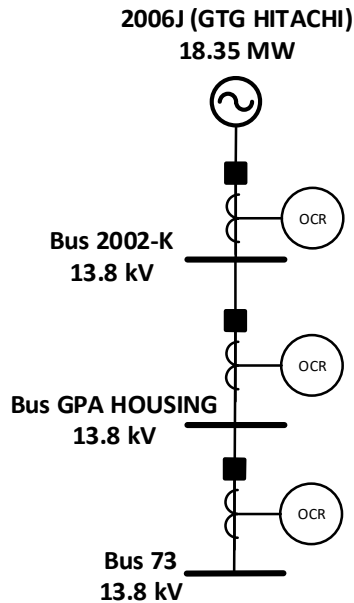
Analisis penentuan kategori PPE yang digunakan pada bus dari hasil *resetting* dapat dilihat pada gambar 4.55:



Gambar 4.55 Kurva batas energi pada kurva R52-12 hasil *resetting* sebagai pengaman bus GPA HOUSING

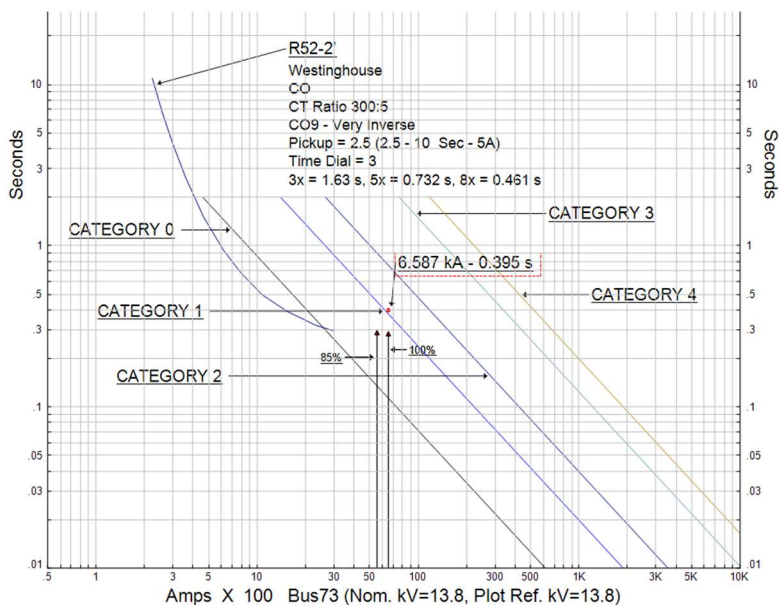
Pada gambar 4.55 terlihat bahwa kurva rele berada di bawah kurva batas energi kategori 2. Kemudian, sesuai dengan standar IEEE 1548-2002, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus *arcing* yang dihubungkan dengan pengaman rele R52-F2 dan R63-LBS-1A pada FCT 0,587 detik. Kondisi maksimum busur api dicapai pada nilai arus *arcing* 100% yaitu sebesar 7,359 kA. Gangguan tersebut berada di atas kurva batas kategori 1. Dari gambar tersebut dapat ditentukan nilai PPE yang harus digunakan pada bus, yaitu PPE kategori 2. Jarak batas busur api maksimum pada kategori tersebut adalah 20,935 meter.

4.5.2.10. Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi Bus 73 pada Kondisi Resetting



Gambar 4.56 Rele R52-2' sebagai pengaman Bus 73

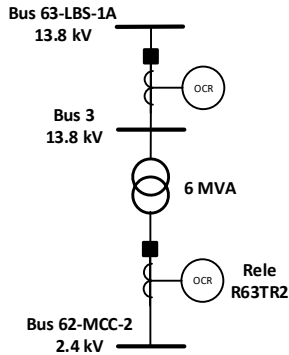
Analisis penentuan kategori PPE yang digunakan pada bus dari hasil *resetting* dapat dilihat pada gambar 4.57:



Gambar 4.57 Kurva batas energi pada kurva rele R52-2' hasil *resetting* sebagai pengaman Bus73

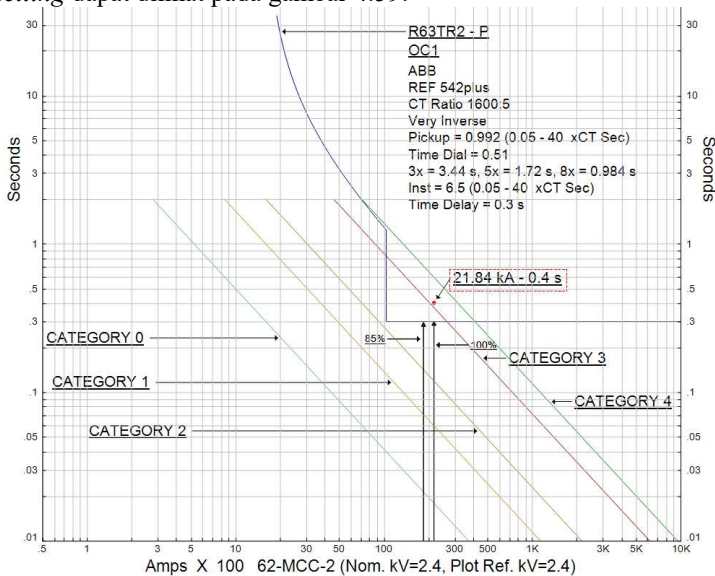
Pada bus ini terlihat bahwa hasil dari *plotting* kurva rele sebagian berada di bawah kurva batas energi kategori 1. Kemudian, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus *arcing* yang dihubungkan dengan pengaman rele R52-6 pada FCT 0,395 detik. Kondisi maksimum busur api dicapai pada nilai arus *arcing* 100% yaitu sebesar 6,587 kA. Gangguan tersebut berada di atas kurva batas kategori 1. Dari gambar tersebut dapat ditentukan nilai PPE yang harus digunakan pada bus, yaitu PPE kategori 2. Jarak batas busur api pada kategori tersebut adalah 6,395 meter.

4.5.2.11. Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi Bus 62-MCC-2 pada Kondisi Resetting



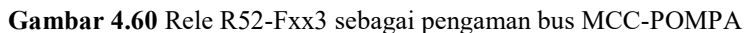
Gambar 4.58 Rele R63TR2 sebagai pengaman bus 62-MCC-2

Analisis penentuan kategori PPE yang digunakan pada bus dari hasil *resetting* dapat dilihat pada gambar 4.59:

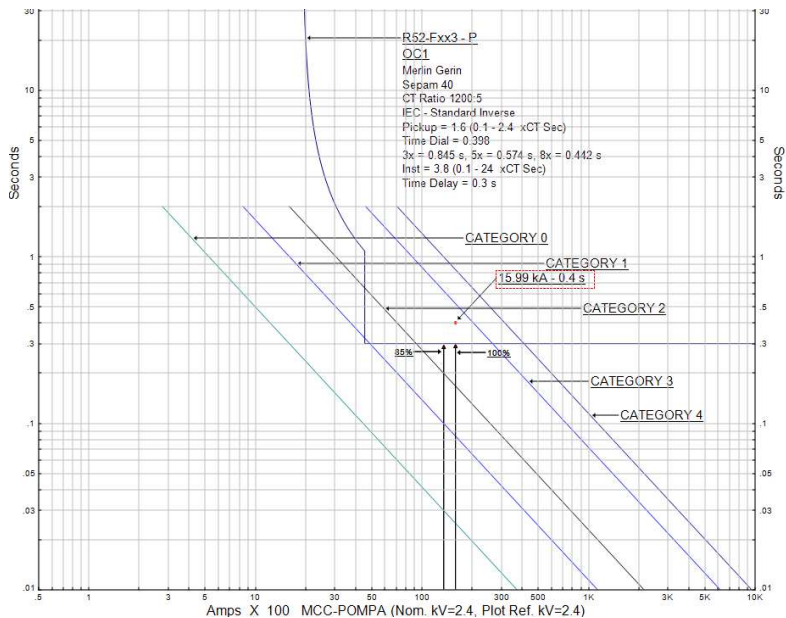


Gambar 4.59 Kurva batas energi pada kurva rele R63TR2 sebagai hasil *resetting* pengaman bus 62-MCC-2

4.5.2.12. Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi Bus MCC-POMPA pada Kondisi Resetting



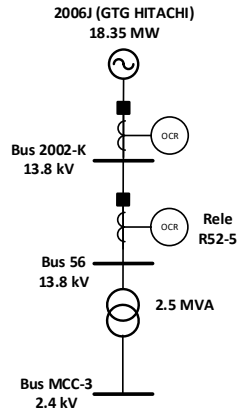
119



Gambar 4.61 Kurva batas energi pada kurva rele R52-Fxx3 dari hasil *resetting* sebagai pengaman bus MCC-POMPA

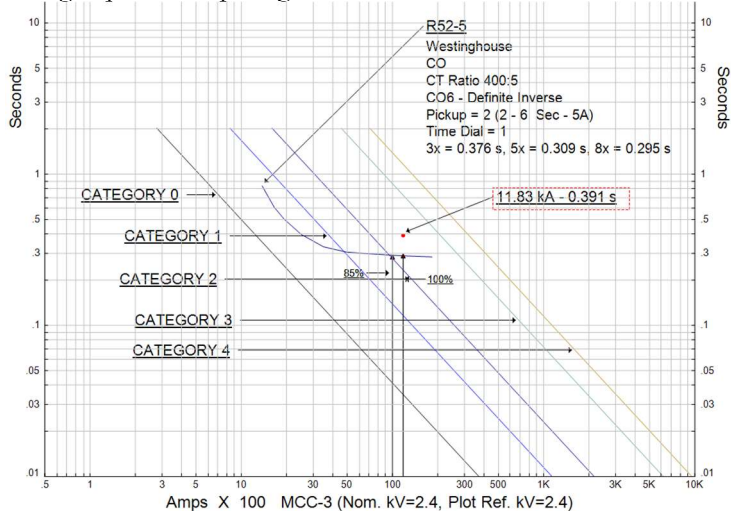
Pada bus ini, terlihat bahwa hasil dari *plotting* kurva rele sebagian besar berada di bawah kurva batas energi kategori 1 dan sebagian kecil di bawah kategori 1. Kemudian, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus *arc* yang dihubungkan dengan pengaman rele R52-6 pada FCT 0,4 detik. Kondisi maksimum busur api dicapai pada nilai arus *arc* 100% yaitu sebesar 15,99 kA. Titik dari gangguan tersebut berada di atas kurva batas kategori 2. Dari gambar tersebut dapat ditentukan nilai PPE yang harus digunakan pada bus, yaitu PPE kategori 3. Jarak batas busur api pada kategori tersebut adalah 10,313 meter.

4.5.2.13. Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi Bus MCC-3 pada Kondisi Resetting



Gambar 4.62 Rele R52-5 sebagai pengaman Bus56 dan bus MCC-3

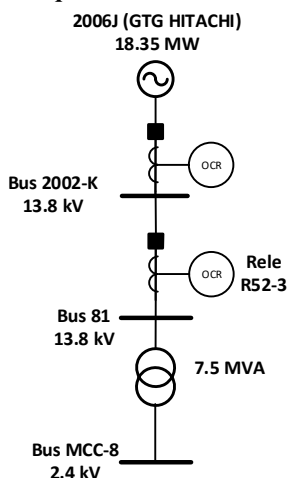
Analisis penentuan kategori PPE yang digunakan pada bus dari hasil *resetting* dapat dilihat pada gambar 4.62:



Gambar 4.63 Kurva batas energi pada kurva rele R52-5 hasil *resetting* sebagai pengaman bus MCC-3

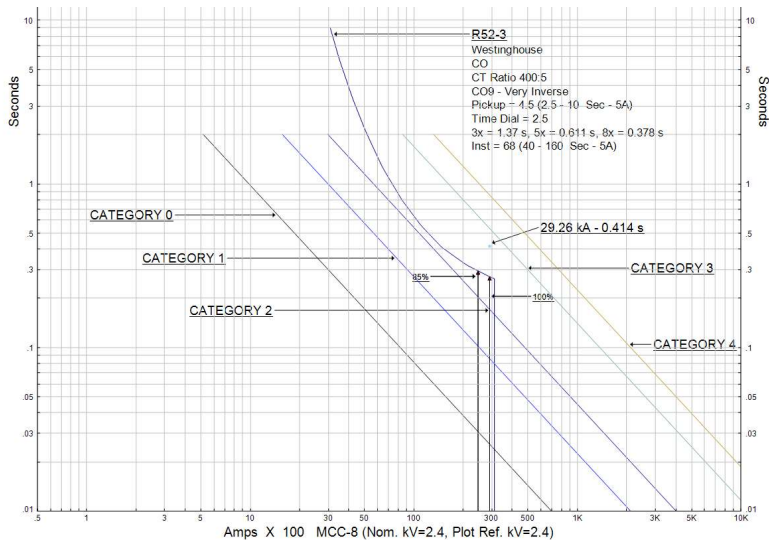
Pada bus ini, terlihat bahwa hasil dari *plotting* kurva rele berada di bawah kurva batas energi kategori 3. Kemudian, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus *arcing* yang dihubungkan dengan pengaman rele R52-6 pada FCT 0.391 detik. Kondisi maksimum busur api dicapai pada nilai arus *arcing* 100% yaitu sebesar 11,83kA. Gangguan tersebut berada di atas kurva batas kategori 2. Dari gambar tersebut dapat ditentukan nilai PPE yang harus digunakan pada bus, yaitu PPE kategori 3. Jarak batas busur api pada kategori tersebut adalah 10,313 meter.

4.5.2.14. Penentuan Kategori PPE Menggunakan Kurva Batasan Energi Bus MCC-8 pada Kondisi Resetting



Gambar 4.64 Rele R52-5 sebagai pengaman Bus81 dan bus MCC-8

Analisis penentuan kategori PPE yang digunakan pada bus dapat dilihat pada gambar 4.65:



Gambar 4.65 Kurva batas energi pada kurva rele R52-3 hasil *resetting* sebagai pengaman bus MCC-8

Pada bus ini, terlihat bahwa hasil dari *plotting* kurva rele berada di bawah kurva batas energi kategori 3. Kemudian, dilakukan pengecekan dengan 85% hingga 100% arus *arcing* yang dihubungkan dengan pengaman rele R52-6 pada FCT 0,414 detik. Kondisi maksimum busur api dicapai pada nilai arus *arcing* 100% yaitu sebesar 29,26 kA. Gangguan tersebut berada di atas kurva batas kategori 2. Dari gambar tersebut dapat ditentukan nilai PPE yang harus digunakan pada bus, yaitu PPE kategori 3. Jarak batas busur api pada kategori tersebut adalah 20,625 meter.

4.6 Perbandingan Metode Perhitungan Menggunakan IEEE 1584 -2002 dengan Metode Menggunakan Kurva Batas Energi pada Kondisi Eksisting dan *Resetting*

Setelah dilakukan analisis mengenai PPE tiap bus dengan menggunakan metode IEEE 1584-2002 dan metode kurva batas energi, didapatkan hasil penunjukkan kategori PPE yang sama. Hasil

perbandingan masing-masing metode pada kondisi eksisting dan *resetting* dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 4.6 Perbandingan penentuan PPE antara IEEE 1584-2002 pada software dan perhitungan manual serta kurva batasan energi eksisting

No	ID Bus	Perhitungan <i>software</i>	Perhitungan manual IEEE 1584-2002	Metode Kurva Batas Energi
		Kategori PPE	Kategori PPE	Kategori PPE
1	GI Kujang	3	3	3
2	00-SG-01	3	3	3
3	63-LBS-1A	1	1	1
4	Bus3	1	1	1
5	2002-K	>4	>4	>4
6	Bus56	1	1	1
7	Bus81	1	1	1
8	Bus64	1	1	1
9	GPA HOUSING	3	3	3
10	Bus73	1	1	1
11	62-MCC-2	2	2	2
12	MCC- POMPA	3	3	3
13	MCC-3	>4	>4	>4
14	MCC-8	>4	>4	>4

Tabel 4.7 Perbandingan penentuan jarak batas aman busur api antara IEEE 1584-2002 pada software dan perhitungan manual serta kurva batasan energi kondisi eksisting

No	ID Bus	Perhitungan <i>software</i>	Perhitungan manual IEEE 1584-2002	Metode Kurva Batas Energi
		Jarak Aman (Meter)	Jarak Aman (Meter)	Jarak Aman Maksimum (Meter)
1	GI Kujang	14,139	14,093	20,625
2	00-SG-01	14,017	13,960	20,625
3	63-LBS-1A	2,947	2,940	3,136

Tabel 4.7 Perbandingan penentuan jarak batas aman busur api antara IEEE 1584-2002 pada software dan perhitungan manual serta kurva batasan energi kondisi eksisting (lanjutan)

No	ID Bus	Perhitungan <i>software</i>	Perhitungan manual IEEE 1584-2002	Metode Kurva Batas Energi
		Jarak Aman (Meter)	Jarak Aman (Meter)	Jarak Aman Maksimum (Meter)
4	Bus3	2,263	2,256	3,136
5	2002-K	35,109	35,267	>33,433
6	Bus56	2,065	2,065	3,136
7	Bus81	2,121	2,130	3,136
8	Bus64	2,258	2,267	3,136
9	GPA HOUSING	8,308	8,345	20,625
10	Bus73	0,94	0,944	3,136
11	62-MCC-2	3,116	3,130	3,197
12	MCC-POMPA	7,768	7,900	10,313
13	MCC-3	16,848	16,925	>16,717
14	MCC-8	59.961	60,215	>33,433

Tabel 4.8 Perbandingan penentuan PPE tiap metode pada kondisi *resetting*

No	ID Bus	Perhitungan <i>software</i>	Perhitungan manual IEEE 1584-2002	Metode Kurva Batas Energi
		Kategori PPE	Kategori PPE	Kategori PPE
1	GI Kujang	3	3	3
2	00-SG-01	3	3	3
3	63-LBS-1A	2	2	2
4	Bus3	1	1	1
5	2002-K	3	3	3
6	Bus56	3	3	3
7	Bus81	1	1	1
8	Bus64	3	3	3

Tabel 4.8 Perbandingan penentuan PPE tiap metode pada kondisi *resetting* (lanjutan)

No	ID Bus	Perhitungan <i>software</i>	Perhitungan manual IEEE 1584-2002	Metode Kurva Batas Energi
		Kategori PPE	Kategori PPE	Kategori PPE
9	GPA HOUSING	2	2	2
10	Bus73	2	2	2
11	62-MCC-2	4	4	4
12	MCC-POMPA	3	3	3
13	MCC-3	3	3	3
14	MCC-8	3	3	3

Tabel 4.9 Perbandingan penentuan jarak batas aman busur api tiap metode kondisi *resetting*

No	ID Bus	Perhitungan <i>software</i>	Perhitungan manual IEEE 1584-2002	Metode Kurva Batas Energi
		Jarak Aman (Meter)	Jarak Aman (Meter)	Jarak Aman Maksimum (Meter)
1	GI Kujang	13,952	14,006	20,625
2	00-SG-01	13,960	14,017	20,625
3	63-LBS-1A	5,984	6,009	6,395
4	Bus3	2,584	2,595	3,136
5	2002-K	16,548	16,624	20,625
6	Bus56	7,025	7,029	20,625
7	Bus81	2,121	2,130	3,136
8	Bus64	7,946	7,985	20,625
9	GPA HOUSING	5,623	5,649	6,395
10	Bus73	3,307	3,325	6,395
11	62-MCC-2	11,121	11,168	16,717
12	MCC-POMPA	7,865	7,900	10,313
13	MCC-3	5,494	5,521	10,313
14	MCC-8	15,953	16,014	20,625

Dari hasil perhitungan manual dan juga hasil perhitungan *software* yang telah dilakukan, tidak ada perbedaan pada penentuan kategori PPE namun terdapat perbedaan yang terletak pada jarak batas busur api atau jarak aman antara metode dengan IEEE 1548-2002 dengan metode kurva batas energi. Pada kurva batas energi hanya dilakukan perhitungan jarak aman maksimum dari nilai energi insiden yang ada pada tiap kategori PPE. Perhitungan seperti energi insiden dinormalisasi serta FCT tidak ditentukan pada metode ini sehingga perhitungan empiris jarak aman seseorang dari titik terjadinya busur api tidak dilakukan pada metode ini. Selain itu, antara hasil perhitungan manual dan perhitungan dengan *software* terdapat sedikit perbedaan pada jarak batas aman busur api yang dikarenakan karena pada perhitungan manual dilakukan pembulatan pada tiap angka yang dihitung.

Pada studi kasus beberapa bus pada kondisi eksisting yang memiliki kategori PPE melebihi level 4, terdapat perbedaan penentuan jarak batas busur api antara metode IEEE 1548-2002 dengan metode kurva batas energi. Dimana hasil dari metode kurva batas energi tidak menentukan nilai tepat dari jarak batas busur api pada bus-bus tersebut, namun hanya memberi hasil agar jarak aman harus lebih besar dari jarak aman pada PPE kategori 4, yaitu 33,433 meter. Sedangkan dengan metode IEEE 1548-2002, jarak aman atau jarak batas busur api tadi dapat dihitung menggunakan persamaan empiris yang telah diberikan sehingga dapat mendekati nilai benar. Hal inilah yang menyebabkan nilai jarak batas aman untuk kategori PPE lebih dari 4 pada metode kurva batasan energi akan lebih kecil dibandingkan dengan jarak batas aman kategori PPE lebih dari 4 metode standart IEEE 1584-2002.

Pada kondisi eksisting juga dapat dilihat bahwa kondisi busur api pada beberapa bus yang dianalisis memiliki kategori busur api yang kecil dibandingkan pada kondisi *resetting*. Hal ini disebabkan oleh waktu pembukaan rele masing-masing bus yang singkat, sehingga FCT atau waktu gangguan busur api dihilangkan juga cepat. Namun dari sisi koordinasi rele arus lebih gangguan fasa, kondisi *resetting* lebih disarankan dalam pemakaiannya. Karena pada kondisi *resetting*, interval waktu antara rele sudah lebih koordinatif.

Dari penentuan PPE yang telah ditetapkan, maka selanjutnya dapat diberikan standar PPE yang harus digunakan sesuai dengan NFPA 70E tahun 2015. Penentuan PPE pada sistem yang telah dilakukan *resetting* dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4.10 Standar PPE yang diberikan NFPA 70E-2015 pada tiap bus kondisi *resetting*

No.	ID Bus	Kategori PPE	Daftar PPE
1	Bus3	1	<ul style="list-style-type: none"> • Pakaian tahan busur api minimal 4 cal/cm² (lihat catatan 1) • Perlengkapan perlindungan (lihat catatan 2)
2	Bus81	1	
3	63-LBS-1A	2	<ul style="list-style-type: none"> • Pakaian tahan busur api minimal 8 cal/cm²(lihat catatan 1) dilengkapi dengan balaclava (topeng ski) • Perlengkapan perlindungan (lihat catatan 2)
4	GPA HOUSING	2	
5	Bus73	2	
6	MCC-3	3	<ul style="list-style-type: none"> • Memakai semua pakaian tahan busur api 25 cal/cm² (lihat catatan 1) dilengkapi dengan jas (jaket dan celana) tahan busur api • Perlengkapan perlindungan (lihat catatan 2)
7	GI Kujang	3	
8	00-SG-01	3	
9	2002-K	3	
10	Bus56	3	
11	Bus64	3	
13	MCC-POMPA	3	
14	MCC-8	3	
14	62-MCC-2	4	<ul style="list-style-type: none"> • Memakai semua pakaian tahan busur api 40 cal/cm² (lihat catatan 1) dilengkapi dengan jas (jaket dan celana) tahan busur api • Perlengkapan perlindungan (lihat catatan 2)

Catatan 1:

1. Baju lengan panjang dan celana panjang atau menggunakan baju *coverall* (memakai salah satu, kecuali untuk kategori 3 dan 4 harus memakai semua)
2. Pelindung muka atau tudung tahan busur api
3. Jaket, parka, jas hujan atau pelindung dalam helm

Catatan 2:

1. Pelindung kepala seperti helm pelindung atau topi keras
2. Pelindung pendengaran seperti sumbatan pendengaran (*ear plug*) atau penutup telinga (*earmuff*)
3. Sarung tangan lapangan atau *heavy duty*
4. Sepatu pelindung berbahan kulit

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari simulasi dan analisis data yang telah dilakukan pada Tugas Akhir ini, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Penggunaan metode kurva batas energi dapat mempersingkat waktu analisis dalam penentuan PPE pada sistem yang memiliki banyak bus. Dari perpotongan kurva rele atau pengaman lain dengan kurva batas energi, ditentukan kategori PPE suatu bus.
2. Hasil perhitungan manual metode IEEE 1548-2002 dan *software* pada bus 2002-K *resetting* serta metode kurva batas energi yang telah dilakukan, kategori PPE pada tiap metode menunjukkan hasil yang sama yaitu pada level 3. Dari setiap bus juga menunjukkan hasil yang sama antara tiap metode, sehingga metode kurva batas energi dapat menentukan kategori PPE dengan tepat.
3. Hasil perhitungan manual metode IEEE 1548-2002 dan *software* pada bus 2002-K eksisting, hasil dari jarak batas aman busur api adalah 35,267 meter dan 35,109 meter. Namun, pada metode kurva batas energi menunjukkan hasil jarak batas aman busur api maksimum yaitu besar dari 33,433 meter. Perbedaan dari tiap metode ditunjukkan dari hasil jarak batas busur api. Dimana pada metode kurva batas energi hanya memberikan hasil berupa jarak batas busur api maksimum di tiap kategori PPE yang ada. Sedangkan pada metode standar IEEE 1548-2002, dapat memberikan hasil jarak batas busur api yang mendekati kebenaran karena pada metode ini energi insiden dan FCT diperhitungkan. Selain itu, antara perhitungan manual dan *software* terdapat sedikit perbedaan karena dilakukan pembulatan dalam perhitungan manual.
4. Sistem koordinasi pengaman eksisting pada PT. Pupuk Kujang belum terkoordinasi dengan baik sehingga perlu disempurnakan. Berdasarkan tipikal yang ada, terlihat bahwa hasil plot kurva arus waktu beberapa rele pengaman untuk kondisi eksisting menunjukkan bahwa rele belum diset dengan baik.
5. Pada kondisi eksisting bus 62-MCC-2, FCT dari busur api adalah 0,116 detik. Setelah dilakukan *resetting*, FCT berubah menjadi 0,4 detik. Hal ini menyebabkan kenaikan energi insiden dari 7,768

cal/cm² menjadi 23,258 cal/cm², sehingga kategori PPE naik dari level 2 ke level 3. Di beberapa bus, terdapat kategori bahaya busur api yang kecil dengan rele arus lebih gangguan fasa eksisting dibandingkan dengan yang sudah di-*resetting*. Hal ini dikarenakan koordinasi dan pengaturan rele arus lebih gangguan fasa yang melindungi bus pada kondisi eksisting kebanyakan memiliki waktu yang lebih cepat dan tidak koordinatif.

5.2 Saran

Mengacu pada hasil Tugas Akhir ini, maka saran yang dapat diberikan penulis antara lain:

1. Dari hasil *plot* dari kurva rele dan kurva batas energi, terlihat bagaimana pengesetan suatu pengaman berdampak pada besarnya energi insiden dari busur api sutau bus. Sehingga, dari tugas akhir ini dapat dijadikan referensi mengenai *setting* pengaman gangguan arus lebih yang sesuai untuk mengurangi besarnya busur api.
2. Terdapat beberapa bus yang memiliki pengaman primer atau utama yang terletak di bagian tegangan tinggi atau primer dari transformer di atasnya seperti pada bus MCC-3 dan MCC-8, sehingga penulis menyarankan agar menambahkan pengaman pada bus tersebut agar koordinasi dapat terjaga dan menurunkan energi insiden yang ada.
3. Penulis menyarankan untuk menambahkan rele 67 atau rele arus lebih gangguan fasa dengan arah pada bus GI KUJANG dan bus 00-SG-01 agar koordinasi rele arus lebih dapat dikordinasikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rob Vojko, “The Basic *Arc flash* Protection,” © *Natl. Saf. Inc.*, 2008.
- [2] Randolph W. Hurst, “Electrical Safety and *Arc flash* Handbook,” © *Natl. Saf. Inc.*, vol. 5, 2009.
- [3] “IEEE Guide for Performing *Arc flash* Hazard Calculations,” *IEEE Std 1584-2002*, pp. 1–113, 2002.
- [4] John C. Pfeiffer, “*Arc flash* Article,” *Pfeiffer Eng. Co Inc*, 2008.
- [5] NFPA 70E, “Standard for Electrical Safety in the Workplace,” © *National Fire Prot. Assoc.*, 2015.
- [6] A. C. Parsons, W. B. Leuschner, and K. X. Jiang, “Simplified *Arc flash* Hazard Analysis Using Energy Boundary Curves,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 44, no. 6, pp. 1879–1885, 2008.
- [7] J. D. Glover, M. S. Sarma, and T. Overbye, *Power System Analysis and Design, Fifth Edition*, 5th ed. CENGAGE Learning, 2012.
- [8] B. de Metz-Noblat, F. Dumas, and C. Poulain, “Cahier Techniques no. 158 Calculation of Short-circuit Currents.” Schneider Electric, 2005.
- [9] “IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems,” p. 751.
- [10] ABB, “Type CO Circuit Opening Overcurrent Relay,” 2002.
- [11] GE Digital Energy, “489 Generator Management Relay Instruction Manual,” p. 259, 2013.
- [12] Schneider Electric, “SepamTM Series 40,” 2003.
- [13] ABB, “SPAM 150 C Motor Protection Relay User’s Manual and Technical Description.”
- [14] ABB, “REF 542plus Technical Reference Manual,” 2002.
- [15] ABB, “SPAJ 140 C Overcurrent and Earth-Fault Relay User’s Manual and Technical Description,” 2007.
- [16] Mitsubishi Electric, “MITSUBISHI Numerical Protection Relay MELPROTM -D Series,” 2015.

- [17]Siemens, *SIPROTEC 4, SIPROTEC easy, SIPROTEC 600 Series, Communication, Accessories Catalog SIP*, 7th ed. 2013.

BIOGRAFI PENULIS



Ghiffari Al Rasyd, lahir di Tanjung Pura, Sumatra Utara pada tanggal 19 September 1997. Penulis lulus pendidikan jenjang Sekolah Menengah Atas dari SMA Swasta Cendana Mandau pada tahun 2015. Semenjak tahun 2015, penulis terdaftar sebagai mahasiswa bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Selama kuliah, penulis aktif

di beberapa kegiatan kepanitiaan dan organisasi. Penulis juga aktif sebagai asisten Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST B204) ITS. Penulis dapat dihubungi melalui email ghiffari09@outlook.com.